

DISEÑO DE UNA CADENA DE ABASTECIMIENTO FRUTÍCOLA CON UN
ENFOQUE DE SOSTENIBILIDAD

MAYRA ALEJANDRA ARENAS RUIZ
LEIDY TATIANA SALAZAR AGUIRRE

UNIVERSIDAD DEL VALLE - SEDE ZARZAL
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA INDUSTRIAL
ZARZAL
2018

DISEÑO DE UNA CADENA DE ABASTECIMIENTO FRUTÍCOLA CON UN
ENFOQUE DE SOSTENIBILIDAD

MAYRA ALEJANDRA ARENAS RUIZ
LEIDY TATIANA SALAZAR AGUIRRE

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR POR
EL TÍTULO DE INGENIERO INDUSTRIAL

DIRECTOR
DIEGO LEON PEÑA OROZCO MSc.

UNIVERSIDAD DEL VALLE - SEDE ZARZAL
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA INDUSTRIAL
ZARZAL
2018

Nota de Aceptación:

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Zarzal Valle del Cauca, Marzo del 2018

DEDICATORIA.

A mi papá José Humberto Salazar Vásquez, quien siempre está a mi lado espiritualmente en cada decisión, y sé que estaría muy orgullosa de ver cumplir mis objetivos.

A mi mamá Blanca Nubia Aguirre, la persona más incondicional en mi vida, quien nunca me ha fallado, ni nunca me fallará. Ella es un motivo para seguir avanzando, deseo devolverle todos los años de amor, apoyo y cariño como se lo merece con triunfos y metas realizadas.

A mi prima Maria Camila Londoño, quién a pesar de su corta vida me enseñó cosas importantes como vivir y disfrutar los momentos, a reírse de la vida y a tomar las cosas con calma, quiero que sea parte de este proyecto tan importante.

Leidy Tatiana Salazar Aguirre

Este trabajo está dedicado a mis padres Leonor Ruiz Lopez y Jose Rodrigo Arenas, que con sus consejos y ejemplo me llevaron a esforzarme en cumplir los propósitos que me trace en la vida; es por eso que sin ellos no hubiera podido comenzar, ni terminar la meta de ser una ingeniera industrial.

También le dedico este trabajo a mi sobrino Santiago Ruiz Varela con el fin de ser un ejemplo para él, para que se esfuerce en cumplir las metas que se trace en la vida.

Mayra Alejandra Arenas Ruiz

AGRADECIMIENTOS.

Estoy muy agradecida con Dios principalmente por bendecirme todos los días con su infinito amor y por permitirme ver realizar uno de mis más grandes sueños, titularme como Ingeniera Industrial. Solo él sabe todos los obstáculos que de su mano logré superar para llegar a este punto de mi vida, también te doy gracias por guiar las decisiones que he tomado hasta hoy porque ellas me han hecho la gran persona que soy, y finalmente muchas gracias señor porque sin tí este trabajo no hubiera podido ser un gran proyecto del que me siento orgullosa.

Le agradezco a mi familia por estar conmigo apoyándome en la realización de este hermoso proyecto, especialmente a mi mamá Blanca Nubia Aguirre y a mi hermana Natalia Salazar Aguirre quienes me han alentado a seguir adelante y nunca desfallecer en momentos de dificultad, además han sido testigos de los pasos que he tenido que dar para ver culminado exitosamente este trabajo.

Le agradezco a mi amiga y compañera de trabajo, Mayra Alejandra Arenas Ruiz con quien he compartido desde el colegio y estos cinco años llenos de amistad, competitividad, apoyo mutuo al querer ser siempre las mejores, demostrando la dedicación y el esfuerzo que nos ha caracterizado para lograr los objetivos propuestos.

A mis amigos Katleen Alexandra Ospina, Mayra Arenas, Yuliana Liceth Castillo, y Stiven Viedman, por permitirme caminar a su lado en esta ruta llena de conocimiento y experiencias enriquecedoras, gracias por contagiarme de esa buena energía que nos hace ser mejores cada día y por ser incondicionales. Muchas gracias a Paulo Machado por ser una persona incondicional en mi vida, por estar conmigo en los momentos más difíciles y ayudarme a afrontarlos con seguridad e inteligencia.

Al profesor Diego León Peña quien contribuyó con sus conocimientos y experiencia en la realización este trabajo, que gracias a sus aportes logramos direccionar y resolver de manera efectiva los objetivos propuestos.

Al profesor Carlos Rojas por su compromiso con la investigación, ya que de este modo, pudimos ampliar la formación en algunas líneas de la ingeniería, además de tener la oportunidad de participar de eventos extracurriculares que marcaron mi paso por la universidad como una experiencia gratificante que no solo se basa en clases teórico prácticas, sino también en el intercambio de conocimiento y solución de problemas.

Finalmente, le agradezco a la universidad del Valle y todas las personas que forman parte de ella por estos años cargados de mucho aprendizaje.

Leidy Tatiana Salazar Aguirre

Quiero empezar dando gracias a Dios por brindarme las capacidades necesarias para superar cada semestre de la carrera y por ser el gestor principal de la oportunidad de poder estudiar.

Les agradezco a mis padres Leonor Ruiz Lopez y Jose Rodrigo Arenas, por brindarme su apoyo incondicional, por hacer el esfuerzo para que pudiera ir a cumplir una de mis metas, por confiar en que lo lograría y sobre todo por demostrarme su amor cada día, gracias a ellos hoy soy una profesional.

Agradezco también a mi hermano Ivan Darío Ruiz por su cariño, por escucharme hablar de trabajos o temas relacionados con la carrera y por ser un apoyo en todo este proceso.

Continúo dándole gracias a mi compañera de trabajo grado y amiga Leidy Tatiana Salazar Aguirre, por brindarme su amistad, por ser tan tolerante cuando nuestras ideas no concordaban, por querer hacer equipo conmigo en incontables trabajos, por su dedicación, compromiso y esfuerzo, por todo esto puedo decir: juntas empezamos este camino y juntas lo terminaremos con un “lo logramos”.

Le agradezco a Katleen Ospina Osorio, Yuliana Castillo, Stiven Viedman y Daniel Molina Taborda, porque más allá de ser compañeros de clase formamos una gran amistad, sin importar la dificultad sabía que contaba con ellos, son muchos los recuerdos que formamos juntos, la carrera no hubiera sido la misma sin ellos, muchas gracias por ser mis amigos.

Le doy gracias a mi novio Diego Fernando Diaz Camacho por su amor incondicional y por entender el tiempo que dedique a este trabajo y no él.

Le agradezco a mi asesor de tesis Diego Leon Peña por el acompañamiento para la realización de este trabajo, por sus sabios consejos y paciencia brindados.

Mayra Alejandra Arenas Ruiz

TABLA DE CONTENIDO.

1. INTRODUCCIÓN.	14
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	16
2.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	16
2.2 ACOTAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20
2.3 JUSTIFICACIÓN.....	21
3. OBJETIVOS.....	24
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	24
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
4. MARCO TEÓRICO.	25
4.1 TEMÁTICAS ABORDADAS.....	25
4.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	35
5. CARACTERIZACIÓN.....	41
5.1 MACROCARACTERIZACIÓN	42
5.2 MICROCARACTERIZACIÓN	46
6. MODELO REFERENTE.....	48
7. EVALUACION DEL SISTEMA OBJETO DE ESTUDIO FRENTE AL REFERENTE.	58
8. MODELO MATEMÁTICO PROPUESTO.	61
9. CASO DE ESTUDIO.....	75
10. DESARROLLO DEL MODELO PROPUESTO.....	78
11. RESULTADOS Y ANÁLISIS.	80
12. ANALISIS DE SENSIBILIDAD.	97

CONCLUSIONES.	103
RECOMENDACIONES.	105
BIBLIOGRAFÍA.	106

LISTA DE TABLAS

Pág

Tabla 1: Número de artículos por método de solución deterministas publicados en Scopus hasta el año 2013.	33
Tabla 2. Revisión Bibliográfica parte 1.....	37
Tabla 3. Revisión bibliográfica parte 2.	39
Tabla 4. Revisión bibliográfica parte 3.	40
Tabla 5: Aspecto de la macro-caracterización.	43
Tabla 6: Aspecto de la micro-caracterización.	46
Tabla 7. Comparación entre el sistema referente y el objeto de estudio.	59
Tabla 8: Variables del modelo matemático.	62
Tabla 9: Parámetros del modelo matemático.....	63
Tabla 10: Función objetivo 1 - Componente económico.	64
Tabla 11: Función objetivo 2 - Componente social.	66
Tabla 12: Función objetivo 2 - Componente ambiental.....	67
Tabla 13: Restricciones del modelo matemático.....	68
Tabla 14: Restricción especial.	69
Tabla 15: Restricciones enfoque multi-objetivo	73
Tabla 16. Resultados del modelo económico.	81
Tabla 17. Resultados de la variable Bu en el modelo económico.....	82
Tabla 18. Resultados del modelo social.	84
Tabla 19. Resultados de variable Bu en el modelo social.....	85
Tabla 20. Resultados del modelo ambiental.	87
Tabla 21. Resultados de variable Bu en el modelo ambiental.	88
Tabla 22. Matriz de pagos.	89
Tabla 23. Valores de ϵ	89
Tabla 24. Resultados del modelo multi-objetivo.....	91
Tabla 25. Resultados de la variable Bu del modelo multi-objetivo.....	92
Tabla 26. Análisis de sensibilidad parte 1.....	99

Tabla 27. Análisis de sensibilidad parte 2.....	100
Tabla 28. Análisis de sensibilidad parte 3.....	102

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág
Gráfica 1: Producción frutícola colombiana.	17
Gráfica 2: Actividades desarrolladas en la cadena de abastecimiento objeto de estudio.	58
Gráfica 3: Grafo de nodos contemplados en el modelo.	61
Gráfica 4. Grafo de resultados del modelo económico.	82
Gráfica 5. Grafo de resultados del modelo social.	85
Gráfica 6. Grafo de resultados del modelo ambiental.	88
Gráfica 7. Grafo de resultados del modelo multi-objetivo.	92
Gráfica 8. Cantidad de producto a enviar en el flujo 1 y en el flujo 2.	93
Gráfica 9. Cantidad de personas a contratar en cada modelo.	93
Gráfica 10. Costos logísticos arrojados por los modelos matemáticos.	94
Gráfica 11. Emisiones generadas por los modelos matemáticos.	95
Gráfica 12. Cantidad de hectáreas, de productores y número de viajes en los modelos matemáticos.	96

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1: Los tres pilares de la sostenibilidad.	19
Figura 2: Estructura de la macro-caracterización (lado izquierdo) y estructura de la micro-caracterización (lado derecho).....	42
Figura 3: Eslabones del sistema referente.....	48
Figura 4: Eslabones del sistema objeto de estudio modificado.	75

1. INTRODUCCIÓN.

El Valle del Cauca representa una región geográfica cuyas condiciones agroecológicas lo posicionan como un fuerte actor dentro del subsector frutícola colombiano, y por ende, demanda una articulación de procesos agronómicos y logísticos que conlleva una alta competitividad internacional (González & Rojas; 2011), exigiendo cadenas productivas mejor estructuradas en donde se requiere un esfuerzo en la coordinación de los actores, actividades y recursos para cumplir con los requerimientos de los clientes (Vianchá; 2014), las cuales abarcan elementos que van desde la siembra hasta su disposición final.

Con el fin de realizar mejores prácticas en el sector frutícola del Valle del Cauca, se integra a la cadena de suministro el concepto de desarrollo sostenible, que Gopalakrishnan et al (2012) citado por Giovindan et al (2014) lo define como "el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades", logrando de este modo no solo la efectividad de las plantas de producción, sino también, ventajas competitivas para la empresa (Mendoza et al; 2014).

La gestión de la cadena de suministro sostenible (SSCM) fue definida por Seuring y Müller (2008) como "la gestión de los materiales, la información y los flujos de capital, así como la cooperación entre empresas a lo largo de la cadena de suministro, teniendo objetivos enmarcados en las tres dimensiones de desarrollo sostenible", es decir, el económico, medioambiental y social, considerados como los tres pilares de la sostenibilidad (Elkington, 2010). Estos elementos son la base para establecer el desarrollo de procesos más consistentes, con el fin de mejorar el desempeño económico y competitivo de las organizaciones que participan en la cadena (Carter y Rogers; 2008); sin embargo encontrar el equilibrio entre estos tres

componentes es un desafío (Seuring, 2013), debido a que cada uno de ellos maneja objetivos diferentes los cuales pueden entrar en conflicto y desestabilizar la armonía productiva.

En este documento se realiza la formulación de un modelo matemático que considere los elementos de la sostenibilidad en una cadena de abastecimiento frutícola de tres eslabones. El modelo propuesto permite minimizar los costos logísticos y los impactos ambientales relacionados con los gases efecto invernadero como el CO₂ y maximizar la generación de empleo a lo largo de la cadena suministro. Este estudio se lleva a cabo junto con la colaboración de pequeños productores ubicados en la región del centro del Valle del Cauca y cuya producción principal se concentra en el cultivo de frutas cítricas. También se analizan los intermediarios y detallistas que conforman los tres eslabones de la cadena frutícola.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

2.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La cadena de abastecimiento frutícola interactúa dentro del sector de productos perecederos, generando que el diseño de la cadena se torne crítico en el manejo y estimación de tiempos para su colocación en el punto de venta (González & Rojas, 2011).

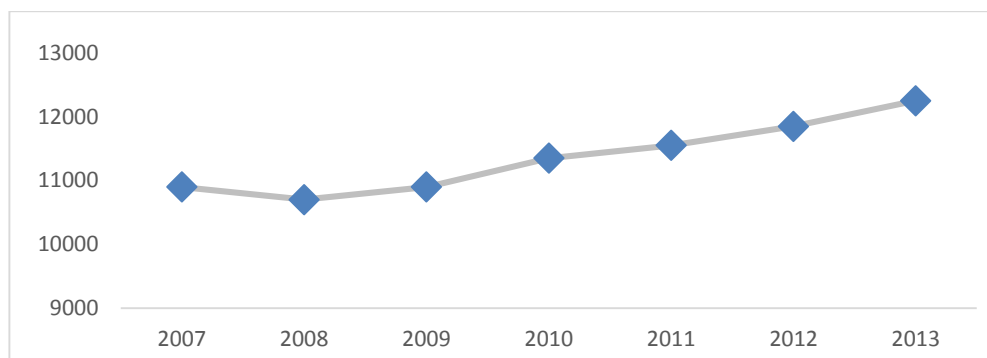
Este tipo de cadenas en la región del Valle del Cauca son aún tradicionales y artesanales, a pesar de ser una generadora de empleo, especialmente en zonas rurales. Se estima, que alrededor del 70% de la producción de frutas está representada por los pequeños y medianos productores de Colombia (Tafur et al, 2006), que presentan limitantes de orden técnico al no estar coordinados, lo cual vuelve más compleja la toma de decisiones tanto en la cosecha como en la postcosecha, afectada por factores como la oferta de variedades, calidad del material de siembra, carencia de nuevos modelos productivos, deficientes modelos de manejo sanitario y falta de procesos de agregación de valor (Hernández, 2009); generando una cadena de suministro (CS) poco eficiente.

Como consecuencia de la globalización, la competencia, las regulaciones gubernamentales y el fuerte incremento de demanda en productos de alta calidad (Soto et al, 2016), los productores se ven presionados en modificar sus operaciones para poder adaptarse a los cambios del entorno, esto se puede evidenciar en el contexto latinoamericano, ya que Colombia es el tercer país, después de Brasil y México con mayor área sembrada 1.083.310 hectáreas de sólo frutas y hortalizas con datos hasta el año 2013, de la Asociación Hortofrutícola Colombiana. Sin embargo en producción ocupa el quinto lugar como consecuencia de una alta deficiencia tecnológica en el campo, esto indica que aún existen falencias en el

diseño productivo de la CS frutícola, pero hace falta un esfuerzo mayor para que sea sostenible en el tiempo.

Según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), en América Latina y el Caribe se mantienen en términos generales patrones de producción y consumo que no son sostenibles, dado que no ha presentado una transformación en su modelo productivo. Es así como el reto para el sector de las frutas frescas tiende a volverse especializado e integrado verticalmente en la cadena frutícola, volviéndose mucho más dinámica y competitiva (Soto et al, 2016).

Gráfica 1: *Producción frutícola colombiana en miles de toneladas.*



Fuente: Adaptado de “Balance y perspectivas del sector hortifrutícola”, de ASOHOFRUCOL, 2014, revista frutas & hortalizas, p.7.

Como se puede evidenciar en la gráfica 1, la producción de frutas frescas ha mostrado un aumento significativo, esto se debe a que las frutas y vegetales producidos en Colombia comparados con aquellos países subtropicales, son mejores en calidad física en relación con las características organolépticas según Procolombia (2013), lo que representa una oportunidad de mejorar las prácticas laborales con un enfoque de sostenibilidad, para poder abastecer la creciente demanda de consumo existente. Aquí juega un papel muy importante el tema de la seguridad alimentaria, la cual aboga por el acceso a los alimentos que se encuentren en condiciones sanitarias adecuadas y la cantidad suficiente para cumplir el objetivo de satisfacer las necesidades alimenticias de la población. Otro

tema relacionado es la pérdida de alimentos en la cadena de suministro, que según datos de la FAO (2012) se estima en un 25% de la producción mundial, en relación con esto, los países en desarrollo como Colombia presentan un 40% de las pérdidas solamente en la fase de poscosecha, este porcentaje refleja una reducción en la cantidad de fruta ofertada en el mercado, ya que representa un problema socioeconómico que afecta directamente la estabilidad de la cadena de suministro y actúa como limitador para lograr la sostenibilidad de ella.

En los últimos años, el mercado mundial y los consumidores exigen un mayor compromiso por parte de los productores para desarrollar prácticas sostenibles, donde se le dé más énfasis a las cuestiones sociales y ambientales. Por ello Tan et al. (2014) citado por Esfahbodi et al (2016) plantea que este cambio ha ocurrido como respuesta a la legislación ambiental y a la mayor conciencia ambiental entre los clientes, por esto Hassini et al. (2012) citado por Feitó et al. (2016) afirman que las cadenas de suministro se encuentran cada vez más presionadas por diversos grupos de interés al tomar decisiones no sólo basadas en objetivos económicos, sino que se deben incluir objetivos ambientales y sociales. Dado que si no hay una relación entre estos elementos, uno de éstos podría servir como facilitador o un inhibidor de la sostenibilidad en función de la forma en que son manejados en la cadena de suministro desestabilizando los actores que la integran (Ahi & Searcy, 2015), de ahí que “surja la necesidad de generar modelos más sostenibles que reduzcan al mínimo los impactos ambientales negativos y a la vez optimicen la producción, conservación y utilización de los recursos naturales de forma eficiente, dentro de un marco de compromiso de reducir la pobreza rural y garantizar la seguridad alimentaria” (FAO, 2016).

Aunque es evidente la importancia de la integración de estos tres componentes “se ha dejado el pilar social en paradero desconocido y aún está lejos de alcanzar la llamada cadena de suministro sostenible, ya que la mayoría de los indicadores sociales son subjetivos y cualitativos (Hutchins & Sutherland, 2008). Por otro lado,

el pilar económico resulta siendo imprescindible en el análisis de la CS, por ende es lógico pensar que será abordado; además en varios casos, la situación económica actual es vista como una línea base para la evaluación de alternativas sobre su impacto ambiental (Seuring, 2013).

Desde la perspectiva individual, en el pilar económico, se pretende aminorar los altos costos logísticos; en la parte ambiental, los problemas enfocados a los impactos ambientales provocados por el transporte; por último, el ámbito social, donde se incluyen las oportunidades de mejora en el factor generador de empleo.

Figura 1: *Los tres pilares de la sostenibilidad.*



Fuente: *Adaptado de “A framework of sustainable supply chain management: moving toward new theory”, de Craig R. Carter & Dale S. Rogers, 2008, International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, p 365.*

Dentro de la balanza de la sostenibilidad con las tres aristas que integran sus componentes ver figura 1, el factor económico ejerce un mayor peso puesto que, para el sector productivo tradicionalmente la creación de valor se sustenta en la obtención de rentabilidad.

Con base en lo anterior, se genera la siguiente pregunta: ¿Cómo diseñar una cadena de suministro de pequeños productores frutícola que considere el enfoque de sostenibilidad?

2.2 ACOTAMIENTO DEL PROBLEMA

Dada la magnitud del trabajo propuesto y la cantidad de variables a ser evaluadas en el estudio de cadenas de suministro frutícola sostenible, se requiere delimitar el problema y hacerlo más específico con el fin de centrar los esfuerzos y enfocar el desarrollo de la investigación.

Para esto, se establecen los límites relacionados al espacio, tiempo, universo y contenido del trabajo. (MORENO, 2017).

El diseño de una cadena de abastecimiento frutícola sostenible se realiza en cinco veredas, las cuales son: Zanjón de Piedras, Tamboral, Monte Hermoso, Madre Vieja y El Oriente, cercanas al municipio de Andalucía ubicado en el centro del Valle del Cauca y en Campoalegre, Zabaleta y el Salto corregimientos de este municipio.

De acuerdo con las investigaciones realizadas al cultivo objeto de estudio, las estimaciones del tiempo de aplicación van a depender de la etapa productiva de este.

En el trabajo se involucran tres eslabones que conforman la cadena de suministro. Se define como el primer eslabón al pequeño productor, al segundo como el intermediario y el tercero como el detallista que interactúan entre sí para movilizar un producto con características perecederas.

Se aborda el tema de sostenibilidad desde los pilares económico, social y ambiental, siendo cada uno de estos muy amplios y que merecen ser tratados

individualmente por su complejidad. En este sentido, el componente económico se aborda lo relacionado con costos logísticos, en el componente ambiental se calcula los impactos ambientales generados por el transporte y en el social, aspectos relacionados con el empleo.

2.3 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, casi 1.000 millones de personas pasan hambre. En el año 2050 habrá que alimentar a 2.000 millones más, por esto la CS sostenible se vuelve necesaria e indispensable en el desarrollo de toda actividad productiva, ya que la agricultura sostenible desempeña un papel clave para un crecimiento integrado a largo plazo, en particular en los países en desarrollo, ya que tiene un gran efecto multiplicador en otros sectores (Comisión Europea, 2012). Con el desarrollo de una actividad frutícola de carácter sostenible se tiene el potencial de impactar a múltiples regiones del país, con los respectivos efectos en la generación de empleo, mejoramiento de las condiciones de vida de la población rural y favorecimiento de la convivencia ciudadana, como base para el establecimiento de una sólida actividad productiva (Tafur et al, 2006). Estos beneficios serán evidentes cuando se implemente el concepto de sostenibilidad en los eslabones de la cadena productiva.

Kearney (2010) citado por Bortolini et al, (2016), señaló que las evidencias más recientes ponen de manifiesto una atención creciente a la gestión ambiental de la cadena de suministro de alimentos, cercana a la preferencia por la inocuidad y la alimentación sana. En este sentido, las organizaciones están considerando cada vez más las consecuencias que traen sus decisiones, por ello los stakeholders involucrados tienen la responsabilidad de velar por procesos eficientes, en los cuales la producción no afecte de manera negativa a su entorno directo e indirecto, además se hace indispensable la asignación de nuevos mecanismos como una estrategia para obtener mayores desempeños tanto en el ámbito logístico enfocados en la distribución y el almacenaje, así mismo en el componente ambiental relacionado con el ciclo de vida de las frutas para conocer su manejo en la cadena

de abastecimiento, y el beneficio social, en el acercamiento de los productos en condiciones óptimas y en la cantidad requerida a los consumidores para promover la seguridad alimentaria.

La información que comunican las empresas sobre sus operaciones y en especial, sobre la cadena de suministro tanto en su componente social como medioambiental es escasa. (Nevado, 2013). Por otra parte, la integración de los tres pilares de la sostenibilidad presenta una dificultad adicional en el proceso de modelado, ya que el componente social no se tiene en cuenta, mientras que el componente económico es imprescindible y en el componente ambiental predominan los criterios basados en la evaluación del ciclo de vida y los criterios de impacto. Esto permite dar tres conclusiones con respecto al estado de las dimensiones en la cadena de abastecimiento:

- La dimensión social está casi completamente ausente o a veces se comprende de una manera demasiado simplificada.
- La dimensión medioambiental se trata principalmente a partir de las categorías basadas en la evaluación del ciclo de vida.
- En la dimensión económica, dominan los enfoques "totales" basados en los costos o los ingresos relacionados con las decisiones.

Esto demuestra que se necesita una integración mucho mejor entre las dimensiones de la sostenibilidad (Seuring 2013).

Sin embargo, para alcanzar estos objetivos es necesario crear conciencia entre todas las partes interesadas y el gobierno, en particular los agricultores y los consumidores, respecto a lo que constituye la agricultura sostenible (BPA, 2012).

Al realizar una propuesta enfocada en la sostenibilidad, se quiere dar a conocer a los grupos interesados los efectos positivos que generan si se adapta en su estilo de producción y distribución, debido a que una agricultura ecológica, económica y

socialmente sostenible puede hacer una contribución importante a retos como reducir la pobreza y garantizar la seguridad alimentaria (Comisión Europea, 2012).

3. OBJETIVOS.

3.1 OBJETIVO GENERAL

- Diseñar una cadena de abastecimiento frutícola con un enfoque sostenible que permita mejorar el equilibrio en el desempeño de las variables económicas, ambientales y sociales.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una caracterización de la cadena de suministro frutícola de la región objeto de estudio que permita identificar las variables claves del sector.
- Diseñar un modelo matemático multi-objetivo que relacione las necesidades de los eslabones para la cadena de abastecimiento e incluya el enfoque de sostenibilidad.
- Analizar la sensibilidad del modelo, determinando los posibles riesgos en la dinámica sectorial.

4. MARCO TEÓRICO.

4.1 TEMÁTICAS ABORDADAS

Cadena de suministro (CS).

Una cadena de suministro (CS) o abastecimiento se describen como los recursos interconectados y las actividades necesarias para crear y entregar productos y servicios a los clientes (Hakanson, 2003). La CS está formada por todas aquellas partes involucradas de manera directa o indirecta en la satisfacción de una solicitud de un cliente e incluye no solamente al fabricante y al proveedor, sino también a los transportistas, almacenistas, vendedores al detalle (o menudeo) e incluso a los mismos clientes (Chopra y Meindl, 2008).

Gestión de la Cadena de suministro (SCM)

La administración de la cadena de suministros supply chain management (SCM) es un término que encierra la esencia de la logística integrada; incluso, va más allá de eso. Es decir, que consiste en la gestión e integración de los productos, servicios e información de los procesos clave del negocio, de los proveedores, productores y distribuidores, que permiten adicionar valor y satisfacer las necesidades de los clientes y los stakeholders (Lambert, 2008). Abarcando todas las actividades relacionadas con el flujo y transformación de bienes, desde la etapa de materia prima (extracción) hasta el usuario final así como los flujos de información relacionados; estos materiales e información fluyen en sentido ascendente y descendente a través de la cadena, para que de este modo se pueda alcanzar una ventaja competitiva sustentable (Ballou, 2004).

La gestión de la cadena de suministro puede comprender 45 a 50 % de los costos de una empresa (Vargas, 2014), es por ello que resulta necesario pensar en distintas soluciones que ayuden a aminorar esfuerzos, a producir y a utilizar de una manera más eficiente los recursos utilizados, más aún en el contexto competitivo

actual en el que se encuentran las empresas, debido a que se deben enfrentar a los desafíos de la innovación constante de nuevos productos, disminución de los ciclos de vida de los productos, la proliferación de productos, la demanda de precios cada vez más bajos y estándares de calidad y servicio cada vez más elevados (Bolwijn & Kumpe, 1998; García & Prado, 2002) citado por García et al (2011).

Sostenibilidad.

Gopalakrishnan et al (2012) citado por Govindan et al (2014) definen la sostenibilidad como "el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades" logrando ventajas competitivas.

Hart (1997) afirma que, considerando los enormes cambios medioambientales que se están experimentando, si el concepto de sostenibilidad se liga a la estrategia y al desarrollo tecnológico, las empresas pueden alcanzar ventajas competitivas considerables. Para que se pueda alcanzar estas ventajas es necesario de una sostenibilidad que tenga en cuenta a la sociedad, la mejora de las condiciones de trabajo, y todo lo relacionado con el medio ambiente, esta relación contribuirá a mejorar el desempeño de las empresas. De ahí, que aparecen nuevos enfoques para mejorar la responsabilidad. (Nevado et al, 2013).

Lograr implementar la sostenibilidad no es sencillo por eso Vinodh & Girubha (2012) citados por Ahi & Searcy (2015) dicen que es un tema complejo y multidimensional, que fusiona la eficiencia y la equidad inter e intra-generacional sobre una base ambiental, económica y social. En consecuencia, la sostenibilidad también se ha reconocido ampliamente como un tema crítico para la supervivencia del negocio en un mundo cada vez más competitivo.

Gestión de la cadena de suministro sostenible (SSCM).

«La gestión sostenible de la SC es la gestión de los flujos de material, información y capital, así como de la cooperación entre compañías a lo largo de la cadena que buscan lograr objetivos en las tres dimensiones del desarrollo sostenible, económica, medioambiental y social, teniendo en cuenta los requerimientos de los clientes y los demás stakeholders» (Seuring & Müller, 2008). Con el fin de satisfacer los requerimientos de las partes interesadas y mejorar la rentabilidad, la competitividad y la resiliencia de la organización a corto y largo plazo (Ahi & Searcy, 2013)

La aplicación de los principios de sostenibilidad en las cadenas de suministro es un área de investigación en evolución que actualmente sufre escasez de teorías, modelos y marcos establecidos. Hay dos razones clave por las que es difícil construir la sostenibilidad en la cadena de suministro:

- En primer lugar, existen numerosos factores dependientes del contexto que permiten o dificultan el progreso hacia la sostenibilidad en una cadena de suministro. lo que implica una necesidad de entender mejor cómo estos factores afectan el desempeño de sostenibilidad de las cadenas de suministro.
- En segundo lugar, la implementación de la sostenibilidad requiere un triple enfoque de fondo, en el cual se buscan mejoras en las dimensiones ambiental, económica y social del desempeño.

Estos dos desafíos significan que la implementación de la sostenibilidad en una cadena de suministro es un proceso complejo que implica un gran número de factores que interactúan (Ahi & Searcy, 2015)

Es importante resaltar en el trabajo presentado por Mejías et al. (2011), se presentan los principales problemas expuestos en el modelo de Seuring & Müller (2008), que dificultan la gestión sostenible como lo son: los elevados costos, la

complejidad y el esfuerzo para coordinar toda la SC, así como la falta de comunicación en la misma.

¿Cuál es la importancia de los tres pilares de sostenibilidad?

Los tres pilares de la sostenibilidad son: ambiental, económico y social, Estos elementos son la base para establecer el desarrollo de procesos más consistentes, con el fin de mejorar el desempeño económico y competitivo de las organizaciones que participan en la cadena (Carter & Rogers; 2008).

Según Vargas (2014), la preocupación ambiental que se vive en el mundo impulsada fuertemente por los problemas de cambio climático tiene una influencia directa en los negocios y va generando una tendencia de mercados, en los cuales la responsabilidad ambiental se convierte en un valor agregado importante, a la vez que asegura la sostenibilidad del negocio bajo una adecuada gestión de la cadena de suministro. Hacer ecológica la SC puede salvar recursos, eliminar o reducir los residuos, mejorar la productividad y las ventajas competitivas al mismo tiempo (Porter & Linde, 1995).

Por otro lado, Mejías et al. (2011) también afirman que en el componente social se ha trabajado en torno a cuestiones de inclusión, diversidad, igualdad y se destacan estudios acerca del nivel de profesionales femeninas en logística, las compras procedentes de pequeños proveedores o el respeto a los derechos humanos en plantas de proveedores de terceros países.

Además, García et al. (2011) presentan los criterios tenidos en cuenta por una empresa alrededor de la responsabilidad social, en donde se incluyen aspectos como las condiciones de trabajo de los empleados, el no uso de niños en el trabajo, la no discriminación ni acoso por tema de sexo o raza, la disminución del impacto medioambiental de sus actividades, la dignidad en los salarios, la libertad de

asociación o la lucha contra la corrupción interna y externa en todas sus manifestaciones.

La cadena de suministro agrícola (CSA)

La sostenibilidad en relación con la agricultura podría definirse como un balance dinámico entre tres elementos interdependientes:

- La protección y mejora de los recursos y los ecosistemas naturales.
- La productividad económica.
- La provisión de infraestructura social como empleo, vivienda, educación, atención médica y oportunidad cultural (Guhl, 2005) tomado de (Alvarez et al, 2007).

Según la revisión hecha por Shukla y Jharkharia (2013), los principales problemas encontrados en la operación de las CSA son: 1) previsión de la demanda, 2) planificación de la producción, 3) gestión de inventarios y 4) el transporte. Existen otros factores que afectan la gestión de las CSA, como el manejo de la información, el territorio, las formas de organización y los tipos de configuración de acuerdo con la manera como se atiende la demanda.

El mercado mundial de productos agrícolas es cada vez más altamente competitivo y demandante (Álvarez et al, 2007). Sin embargo no hay ningún ejemplo activo de un modelo de referencia de proceso para las cadenas de suministro de frutas (Wolfert et al, 2010), lo cual significa que existe un gran espacio para profundizar en este conocimiento, especialmente en el análisis de las cadenas desde una perspectiva más amplia y menos operacional (Vianchá, 2014).

En la investigación realizada por Vianchá (2014) menciona que: “ la gestión de las CSA difiere de la de otras cadenas de suministro, debido a la importancia que tienen factores como la variabilidad del clima; la calidad de los productos; la seguridad alimentaria (Salin, 1998); el manejo de productos perecederos y los ciclos de vida (Seuring & Muller, 2008); la variabilidad de la demanda y los precios (Ahumada &

Villalobos, 2009); la disponibilidad de trabajadores; el rendimiento del cultivo; los costos laborales y los asociados al acopio de los productos (Ahumada et al, 2012); el volumen, la ubicación y la estacionalidad (Karaan et al., 2005); el uso de medios de transporte eficientes que proporcionen un equilibrio entre el tiempo para llegar al mercado y el costo; el manejo poscosecha de los cultivos; el grado de madurez del producto; el tiempo máximo para la entrega; la disponibilidad de los productos; el tiempo de transporte y los costos de entrega (Ahumada & Villalobos, 2009); características como frescura y seguridad de los productos; los porcentajes por pérdidas debido al deterioro que sufre el producto con el paso del tiempo (Yu & Nagurney, 2013); la distancia que debe recorrer el producto para llegar al consumidor (food miles), lo cual determina el impacto económico, social y ambiental (Rajkumar, 2010); la presencia de fenómenos naturales; las reformas a las leyes del sector; los tratados de libre comercio; los procesos de devaluación; la aplicación de nuevas normas fitosanitarias para la comercialización (Fletes, 2000), (Lee et al, 2012), trazabilidad o localización y el seguimiento de la trayectoria del producto (Hu et al, 2013); la calidad del sistema de packaging y branding; la logística eficiente para la adquisición; el alto valor agregado con menores costos operativos (Verdouw et al, 2010); los constantes cambios de precios por exceso o escasez de productos, entre otros”.

Adicional al control de obstáculos, los procesos de planeación de las CSA incluyen cuatro áreas funcionales, como son (Ahumada et al, 2012): producción, cosecha, almacenamiento y distribución. En la producción están comprendidos los cultivos, la cosecha, el nivel de recursos para realizar la actividad, la programación de los equipos, la mano de obra y el equipo de transporte, la planta de transformación o de embalaje. El almacenamiento incluye el control de inventario de los agroalimentos que se requiere cuando los productos necesitan ser almacenados antes o durante su distribución, cantidades para almacenar y vender en cada período de planeación y cómo gestionar el inventario a lo largo de la CS. Por último, la distribución consiste en mover el producto de la CS para entregarlo a los

consumidores, e incluye la selección del modo de transporte, las rutas que van a utilizarse y el calendario de envío para la entrega del producto.

La agricultura sostenible puede entenderse como el uso de prácticas que mantienen o promueven la habilidad de las personas o comunidades para alcanzar su bienestar social y cultural, la viabilidad económica de la agricultura, la conservación de su base en recursos naturales y de otros ecosistemas influenciados por las actividades agrícolas, así como la calidad y la seguridad de alimentos. (Guhl, 2005) tomado de (Álvarez et al, 2007).

Dentro de la agricultura sostenible se pueden incluir diversos conceptos, tales como granjas productivas, no uso o uso mínimo de plaguicidas y de herbicidas, sensibilidad ambiental, manejo a largo plazo del suelo, alimentos sanos, preocupaciones por la salud y bienestar de los agricultores, buen trato a los animales y el desarrollo rural (flower label program, 2003) citado por (Álvarez et al, 2007)

Es por esto que la FAO (2015) da lugar a cinco principios claves para guiar el desarrollo estratégico de nuevos enfoques y la transición hacia la sostenibilidad, además en la cumbre Marrakech se tuvo en primer lugar la gestión sostenible de la agricultura, donde se plantearon posibles soluciones a los problemas a los que se enfrenta la agricultura sostenible (El país 2016). De ahí que un método de solución posible sea la optimización multiobjetivo para la evaluación de los conceptos y prácticas claves del entorno económico, social y ambiental que afectan directa o indirectamente la agricultura (Muñoz, 2016), con el fin de contribuir a mejorar la calidad vida de los productores.

Métodos de optimización multi-objetivo.

Programación multi-objetivo.

Los problemas de optimización multi-objetivo son problemas que presentan dos o más funciones objetivo que incluyen un conjunto de k funciones objetivo, un conjunto de m restricciones y un conjunto de n variables de decisión (Marler & Arora, 2004 citado por Mendoza et al, 2014). Los problemas multi-objetivo no tienen solución óptima a diferencia de los problemas mono objetivos, que pueden alcanzar la solución óptima, esto se debe a que no existe una solución que sea la mejor respecto a todos los objetivos e incluso pueden existir conflictos entre los objetivos. Una solución puede ser mejor en un objetivo, pero peor en otros. (Pradenas & Matamala, 2012).

Para el caso de los modelos de CSA de productos perecederos, el enfoque más popular y exitoso es la programación lineal, específicamente cuando se han parametrizado suficientemente los datos de entrada (Ahumada & Villalobos, 2009).

Los métodos de solución deterministas más utilizados se aprecian en la tabla 1.

Tabla 1: *Número de artículos por método de solución deterministas publicados en Scopus hasta el año 2013.*

MÉTODO	NOMBRE EN INGLES	TOTAL ARTICULOS
Programación por metas	Goal programming	969
Suma ponderada	Weighted sum	696
Restricción épsilon	ϵ -constraint	399
Función logro	Achievement scalarizing function	22
Enfoque Roy	Roy approach	13
Producto ponderado	Weighted product	13
Esquema de arbitraje de Nash	Nash arbitration scheme	9
Función compromiso	Compromise function	7
Media geométrica ponderada	Wieghted geometric mean approach	5
Suma objetivo	Objective sum	4
Enfoque de Pascoletti-Serafini	Pascoletti-Serafini method	4
Método de Benson	Benson's method	3
Norma ponderada	Weighted norm	3
Criterio global ponderado	Weighted global criterion	3
Restricción elástica	Elastic constraint approach	2
Exponencial ponderado	Exponential weighted	2
Producto objetivo	Objective product	2
Potencia media ponderada	Weighted power mean	2

Fuente: Adaptado de “Optimización multi-objetivo en la gestión de cadenas de suministro de biocombustibles. Una revisión de la literatura. De Aranda J. y Orjuela J., 2015, Ingeniería Vol. 20, p. 42.

Optimización de Pareto

El economista italiano Wilfredo Pareto (1938), formuló una serie de principios, que han imperado en la sociedad, llamado Óptimo de Pareto, quien según Millar y Meiners (1989) citado por Reyes & Franklin (2014) señalan “que cualquier cambio de situación afectaría a una economía sin perjudicar a otra. Es decir, las situaciones son eficientes, si al haber un cambio de esa situación, se beneficia a alguno, sin perjudicar a otro”. Este permite distinguir las situaciones óptimas y las sub-óptimas. En una situación óptima es imposible mejorar el bienestar de alguien sin que disminuya el de otros. En una situación sub-óptima, por el contrario, estos cambios son posibles.

A continuación, se describen los métodos de programación por metas, suma pondera y restricción épsilon, los cuales son los tres métodos más utilizados para dar solución a los problemas multi-objetivo como se muestra en la en la tabla 1.

Método de programación por metas.

La Programación por Metas (Goal Programming) según Quesada & Vergara (2006) fue inicialmente introducida por Charnes y Cooper en los años 50. En principio fue dirigida a resolver problemas industriales, sin embargo posteriormente se ha extendido a muchos otros campos como la economía, agricultura, recursos ambientales, recursos pesqueros, etc. Resulta de gran interés, sobre todo, en problemas complejos de gran tamaño.

Consiste en que se deben fijar los objetivos/ atributos, $f(x)$, que se consideran relevantes para el problema que estemos analizando. A continuación, se debe determinar el nivel de aspiración, siendo éste el nivel de logro del atributo que el decisor considera aceptable para posteriormente definir las metas, que es un combinado de atributos y niveles de aspiración. Cada meta se convierte en una restricción “blanda” a incorporar en el modelo de programación por metas, además de considerar variables de desviación.

Método de las ponderaciones.

Según Morales (2014), este método pertenece al grupo de técnicas generadoras que se basan en la obtención de un conjunto completo de soluciones eficientes (Guerras, 1989 citado por Morales, 2014). Propone que a partir de un problema multi-objetivo, se crearán problemas mono-objetivos asociados a él. A cada una de estas funciones, se le asigna un valor, de forma que la importancia relativa dentro del problema multi-objetivo sea diferente para cada una de esas funciones. Esta ponderación tiene un carácter subjetivo, y corresponde a la elección de los valores por el analista, el cual debe estudiar detenidamente las consecuencias de establecer esa valoración. Según Romero (1996) citado por Morales (2014), “por medio de la parametrización de los pesos asociados a los objetivos se va

aproximando el conjunto eficiente o conjunto de soluciones Pareto óptimas” (p. 38). Tras realizar esta ponderación, se resuelve el problema mono-objetivo resultante. Cabe resaltar las siguientes ventajas e inconvenientes de este método:

- Permite, si las ponderaciones están bien asignadas, una solución eficiente.
- Permite establecer varios escenarios según nuestras preferencias. Bastaría con ir jugando con los valores de λ .
- Es un método sencillo de aplicar.
- Da una representación aproximada del conjunto de soluciones.
- Es necesario que las funciones se muevan en unidades similares.
- En caso de existir muchas restricciones, conllevaría una gran cantidad de tiempo y recursos llegar a resolver el problema.

Metodo de E-Constraint.

El método de e- constraint o de la e- restricción es capaz de brindar el frente exacto de Pareto. Además es uno de los más utilizados en la programación multi-objetivo. (Arrellano, 2014).

Las ventajas de este método radican en la facilidad de su aplicación y en la capacidad de la técnica para encontrar soluciones que pertenecen al conjunto óptimo de Pareto. Si bien la técnica es incierta, en términos de que no se sabe si ha encontrado todas las soluciones, por lo menos es cierto que las soluciones que encuentra son óptimas, y se puede garantizar que pertenecen a la frontera eficiente. La exactitud del proceso de búsqueda depende del tomador de decisiones en la asignación de los incrementos en el parámetro ϵ . (Osorio et al, 2014).

4.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Se realiza una búsqueda en la literatura de trabajos desarrollados en torno a investigaciones de cadenas de abastecimientos sostenibles con el objetivo de

analizar los diferentes métodos de solución y los contextos en los cuales se desarrollaron. Se emplea como buscadores las bases de datos Scopus, Science Direct, Redalyc.org y Google Académico, filtrando por medio de palabras claves como: sostenibilidad, sostenibilidad en la cadena de abastecimiento, programación multi-objetivo, diseño de cadenas de abastecimiento sostenible y/o frutícola, sostenibilidad en la fruticultura. En la búsqueda los documentos que abordan los temas de cadenas de abastecimiento frutícola con un enfoque de sostenibilidad son pocos.

A continuación se presentan algunos de los trabajos encontrados en la literatura, que ofrecen una orientación temática sobre la forma en la que se han abordado los problemas de sostenibilidad en la cadena de abastecimiento

En la tabla 2, 3 y 4 se presenta la revisión entre el 2008 y el 2017 donde se observa en los primeros años de este periodo un interés notorio en identificar las diferentes tendencias en cuanto a los enfoques para estudiar la sostenibilidad en las cadenas, trabajos como el presentado por Seuring (2013) informa sobre 300 artículos trabajados en sostenibilidad hasta esa época, se identifica en adelante el alcance en el estudio de la sostenibilidad en términos de las dimensiones que se involucran, empezando por estudios de cadenas verdes e impactos ambientales para finalmente abordar problemas que consideran las dimensiones económicas, sociales y ambientales como los tres pilares fundamentales de la sostenibilidad. Adicionalmente se describen los métodos de solución de los problemas estudiados, los cuales en el 15,38% de los casos la solución se abordó desde la programación lineal entera mixta. Otros métodos identificados como la programación no lineal entera mixta, los modelos probabilísticos, el uso de números difusos y TOPSIS difuso y métodos combinatoriales, representan 7,69% de las estrategias de solución. Algunos de los problemas formulados tienen que ver con la integración de la sostenibilidad al diseño de cadenas de suministro, la selección de proveedores y la búsqueda de maximización de desempeños.

Tabla 2. *Revisión Bibliográfica parte 1.*

AUTOR	AÑO	TITULO	TEMATICA	METODOLOGIA	APORTE	B.D	REVISTA
Rajeev, A., Pati, R., Padhi, S. & Govindan, K	2017	Evolution of sustainability in supply chain management: A literature review	Gestión de la cadena de suministro sostenible	Revisión bibliográfica	Este documento cubre ampliamente el crecimiento exponencial del tema de SSCM a través de una lente evolutiva; en el se realizo un análisis temático exhaustivo de 1068 artículos filtrados de 2000 a 2015 y un estudio en profundidad sobre 190 artículos que cubren todos los pilares de la sostenibilidad.	Redalyc.org	Journal of Cleaner Production
Ahi, P., Jaber, M. & Searcy, C.	2016	A comprehensive multidimensional framework for assessing the performance of sustainable supply chains	Gestión de la cadena de suministro sostenible	Marco integrador multidimensional	El marco es una extensión del modelo de sostenibilidad desarrollado en un estudio anterior por Ahi y Searcy. La contribución clave de la investigación es que el marco estocástico propuesto es capaz de acomodar cualquier cantidad de características de desempeño asociadas con SSCM.	Scopus	Applied Mathematical Modelling
Feitó, M., Crespón, R., & Rubio, M.	2016	Modelos de optimización para el diseño sostenible de cadenas de suministros de reciclaje de múltiples	Cadena de suministro sostenible	Programación no lineal entera mixta, Ecoindicador 99 y método de las restricciones	El modelo propuesto resulta un novedoso aporte para el diseño de las cadenas de suministros sostenibles de reciclaje puesto que integra objetivos económicos y ambientales, soporta varias decisiones tácticas y estratégicas como localización de instalaciones, diseño del flujo material y asignación de transporte.	Redalyc.org	Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería
Schöggl, J., Fritz, M., & Baumgartner, R.	2016	Toward supply chain-wide sustainability assessment: a conceptual framework and an aggregation method to assess supply chain performance.	Cadena de suministro sostenible	Revisión bibliográfica	Trabaja con indicadores de desempeño (gobernabilidad cualitativa y compromiso e indicadores de desempeño cuantitativo) etapas para recopilar información sobre sostenibilidad y evalúan la sostenibilidad social	Science Direct	Journal of Cleaner Production
Brandenburg, M. & Rebs, T.	2015	Sustainable supply chain management: a modeling perspective.	Cadena de suministro sostenible	Revisión bibliográfica	Revisión de modelos matemáticos con el objetivo de presentar las tendencias en la investigación del tema. Predominan los enfoques deterministas y la integración de aspectos ambientales de la sostenibilidad, mientras que se descuidan las técnicas de modelado estocástico y la consideración de factores sociales.	Springer Science	Annals of Operations Research
Mota, B., Gomes, M., Canvalho, A., & Barbosa, A.	2015	Towards supply chain sustainability: economic, environmental and social design and planning	Cadena de suministro sostenible	Programación lineal entera mixta	El pilar económico es abordado teniendo en cuenta los costos de la cadena de suministro. emplean una metodología de evaluación ambiental llamada RECIPE. Por último, un indicador social adecuado para evaluar las decisiones estratégicas. La relevancia de este modelo como un sistema de apoyo a las decisiones se destaca con su aplicación a un caso real	Scopus	Journal of Cleaner Production
Ahi, P. & Searcy, C.	2015	Assessing sustainability in the supply chain: A triple bottom line approach	Cadena de suministro sostenible	Modelo probabilístico	Propone un modelo que se basa en la noción de que una representación probabilística de la sostenibilidad puede explicar de manera realista sus desafíos. Se guio por la necesidad de facilidad de uso, simplicidad y la capacidad de proporcionar rápidamente comentarios sobre el estado de sostenibilidad de las cadenas de suministro a lo largo del tiempo.	Science Direct	Applied Mathematical Modelling

AUTOR	AÑO	TÍTULO	TEMÁTICA	METODOLOGÍA	APORTE	B.D	REVISTA
Giovindan, K., Jafarian, A., & Khodaverdi, R.	2013	A fuzzy multi criteria approach for measuring sustainability performance of a supplier based on triple bottom line approach	Gestión de la cadena de suministro sostenible	Uso de números difusos y TOPSIS difuso	Este documento explora las iniciativas sostenibles de la cadena de suministro y examina el problema de identificar un modelo efectivo basado en el enfoque Triple Bottom Line (económico, ambiental y social) para las operaciones de selección de proveedores en cadenas de suministro presentando un enfoque difuso de criterios múltiples.	Science Direct	Journal of Cleaner Production
Ahi, P. Searcy, C.	2013	A comparative literature analysis of definitions for green and sustainable supply chain management	Gestión de la cadena de suministro verde y sostenible	Revisión bibliográfica	Se identificaron un total de 22 definiciones para gestión de la cadena de suministro verde (GSCM) y 12 definiciones para gestión de la cadena de suministro sostenible (SSCM). El análisis muestra que las definiciones de GSCM generalmente se centraron más estrictamente que las de SSCM y se propone una nueva definición para SSCM.	Scopus	Journal of Cleaner Production
Seuring, S.	2013	A review of modeling approaches for sustainable supply chain management	Gestión de la cadena de suministro sostenible	Revisión bibliográfica	Se han publicado más de 300 artículos en los últimos 15 años sobre el tema de las cadenas de suministro verdes o sostenibles. En cuanto a las metodologías de investigación empleadas, solo 36 documentos aplican modelos cuantitativos.	Science Direct	Decision Support Systems
Chaabane, A., Ramudhin, A. & Paquet, M.	2012	Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme.	Cadena de suministro sostenible	Programación lineal entera mixta	Se desarrolla para una industria de aluminio, completan decisiones multiobjetivo, evaluación de ciclo de vida. Su objetivo es maximizar el desempeño. No se modela el aspecto social. Se analizan los costos logísticos, ambientales (emisiones de carbono, rendimiento del reciclaje, manejo de residuos y uso de energía) en cuanto a emisiones y las prestaciones sociales (calidad de vida, ruido)	Science Direct	Int. J. Production Economics Elsevier B.V.
Hutchins, M. & Sutherland, J.	2008	An exploration of measures of social sustainability and their application to supply chain decisions.	Cadena de suministro sostenible	Un método para combinar las métricas de sostenibilidad social	Revisan las métricas, indicadores y marcos de impactos e iniciativas sociales relativos a su capacidad para evaluar la sostenibilidad social de las cadenas de suministro. Mediante la evaluación del ciclo de vida se identifica las variables críticas, estableciendo las condiciones bajo las cuales los modelos son válidos y desarrollan el proceso para ponderar indicadores.	Science Direct	Journal of Cleaner Production Elsevier B.V.
Carter, C.R. & Rogers, D.S.	2008	A framework of sustainable supply chain management: moving toward new theory	Gestión de la cadena de suministro sostenible	Revisión bibliográfica	Proporciona una revisión exhaustiva de la literatura de sostenibilidad, introduce la sostenibilidad en el campo de la gestión de la cadena de suministro y amplía la conceptualización de la sostenibilidad más allá del triple objetivo para considerar las facetas clave que se postulan como requisitos para implementar SSCM prácticas.	Google Académico	International Journal of Physical Distribution & Logistics Management

Fuente: Autores.

Por otra parte se hallaron 2 trabajos (Ver tabla 3) presentados en los últimos 6 años, donde abordan problemas de diseño de red y de planificación de producción y distribución de productos agrícolas. Como estrategias de solución de los problemas formulados se utiliza la programación lineal multi-objetivo y modelos probabilísticos.

Tabla 3. *Revisión bibliográfica parte 2.*

AUTOR	AÑO	TITULO	TEMATICA	METODOLOGIA	APORTE	B.D	REVISTA
Bortolini, M., Faccio, M., Ferrari, E., Gamberi, M., & Pilati, F.	2015	Fresh food sustainable distribution: cost, delivery time and carbon footprint three-objective optimization.	Cadena de suministro agrícola	Programación lineal multiobjetivo	Aborda el diseño y planificación de una red de distribución de frutas frescas. Teniendo en cuenta los costos operativos, la huella de carbono y los objetivos de tiempo de entrega considerando las restricciones típicas de distribución de alimentos. Consideran tanto la vida útil de alimentos frescos como la posibilidad de múltiples transportes modales.	Science Direct	Journal of Food Engineering
Ahumada, O., Villalobos, J. & Mason, A.	2012	Tactical planning of the production and distribution of fresh agricultural products under uncertainty.	Cadena de suministro agrícola	Modelo estocástico	Planificación táctica básica para un productor de alimentos agrícolas frescos que se encarga de las decisiones de producción y distribución. Con el fin de desarrollar planes de crecimiento robustos. Lo que proporciona al agricultor una herramienta para tomar decisiones basadas en la tolerancia al riesgo.	Science Direct	Agricultural Systems Elsevier B.V.

Fuente: Autores

Finalmente, se presenta la revisión de trabajos con temáticas de optimización multi-objetivo (Ver tabla 4), de este se encontraron 4 trabajos, cuyas metodologías fueron, la revisión bibliográfica donde se comenta lo más utilizado para abordar los tres objetivos de desarrollo sostenible; los algoritmos evolutivos y genéticos, que abordaron tópicos relacionados con la reducción de costos en la cadena, el diseño de redes de distribución y la programación de cirugías semanales.

Tabla 4. *Revisión bibliográfica parte 3.*

AUTOR	AÑO	TITULO	TEMATICA	METODOLOGIA	APORTE	B.D	REVISTA
Aranda, J. A. & Orjuela, J. A.	2015	Optimización multiobjetivo en la gestión de cadenas de suministro de biocombustibles. Una revisión de la literatura	Optimización multiobjetivo	Revisión bibliográfica	El estudio muestra que el costo es el objetivo económico mas frecuente, las emisiones de efecto invernadero son el objetivo ambiental mas utilizado y el número de empleos creados es el criterio social mas considerado y se dejan de lado aspectos relevantes como la seguridad alimentaria.	Redalyc.org	Ingeniería
Mendoza, A., Fontalvo, T. & Visbal, D.	2014	Optimización multiobjetivo en una cadena de suministro	Optimización multiobjetivo	Algoritmo evolutivo	En las diferentes funciones objetivo incluye, los costos de inversión, los costos de materia prima, los costos de producción, así como también el Lead Time en toda la cadena. con un caso aplicativo de tres proveedores, tres plantas de producción, tres centros de distribución, tres mercados de consumo, dos tipos de materia prima y dos clases de transporte	Redalyc.org	Revista Ciencias Estratégicas
Validi, S., Bhattacharya, A., & Byrne, P.	2014	A case analysis of a sustainable food supply chain distribution systema multi - objective approach	Cadena de suministro	Modelo de optimización multiobjetivo	En la industria láctea, para el diseño de una red de distribución a una cadena de suministro. un modelo de optimización multiobjetivo verde que reduce al mínimo las emisiones de CO2 procedentes del transporte, los costos totales de la cadena de distribución y las rutas óptimas recorridas.	Science Direct	Int. J. Production Economics Elsevier B.V.
Pradenas, L. & Matamala, E.	2012	Una formulación matemática y de solución para programar cirugías con restricciones de recursos humanos en el hospital público	Optimización multiobjetivo	Algoritmo genético	Aporta una nueva forma de abordar el problema de programación de cirugías, desde la programación matemática, que permite la programación semanal de intervenciones quirúrgicas, cumpliendo con los requerimientos de pabellones y personal especializado necesario para su realización.	Redalyc.org	Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería

Fuente: Autores.

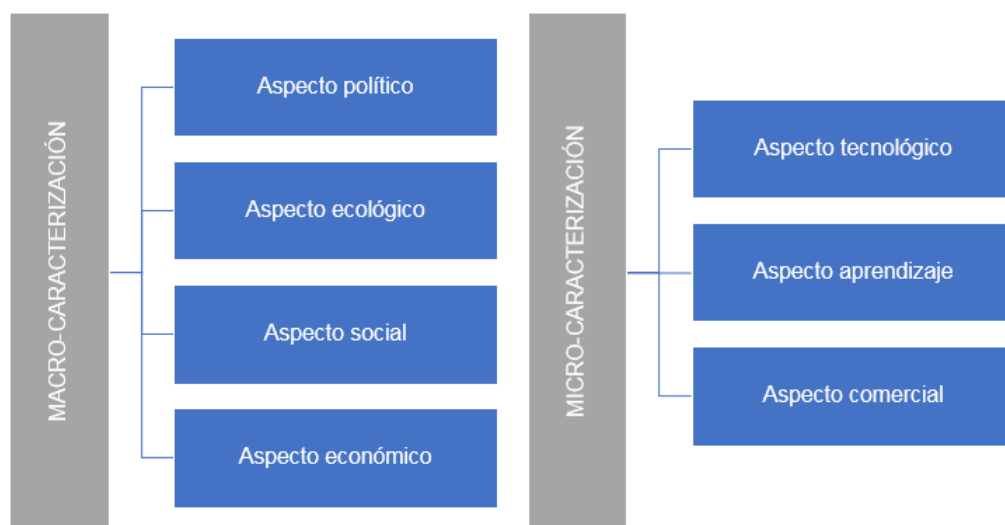
La cadena de suministro ha aumentado la aplicación del concepto de desarrollo sostenible, ya que ha tomado fuerza a nivel global, debido a las consecuencias generadas por la mala utilización de los recursos que a través del tiempo han provocado mayores impactos. Esto se debe a que los sistemas y las organización no han encontrar un equilibrio entre los tres pilares de la sostenibilidad, este tipo de situaciones se puede evidenciar en los diferentes trabajos presentados en la revisión bibliográfica.

5. CARACTERIZACIÓN.

La caracterización de la cadena de abastecimiento frutícola se aborda desde los aspectos macro y micro ambientales. El primero permite identificar aquellos lineamientos de carácter general que pueden afectar el desempeño de las cadenas de abastecimiento y que se reflejan en políticas a nivel mundial que orientan la intención de los países y del mundo en general en función al desarrollo de actividades productivas de interés general. En contraste el micro ambiente propone identificar aspectos más cercanos a la operatividad productiva que se desarrollan en un ámbito más práctico y tienen una relación directa con el manejo eficiente de recursos. En el caso de la caracterización de la cadena de abastecimiento frutícola (Ver figura 2) la caracterización está compuesta por dos pilares la macro y la micro caracterización. Con el primer pilar se abordan los aspectos: político, ecológico, social y económico; y con el segundo los aspectos tecnológico, de aprendizaje y comercial; considerados como los más pertinentes para el estudio que se plantea en este trabajo.

La información presentada ha sido tomada de la recopilación teórica de la cadena de abastecimiento frutícola de Peña et al (2017).

Figura 2: Estructura de la macro-caracterización (lado izquierdo) y estructura de la micro-caracterización (lado derecho).



Fuente: Adaptado de “macrocaracterización y microcaracterización de la cadena de abastecimiento. Recopilación teórica”, de Peña et al, 2017.

A continuación, se describen cada uno de los aspectos asociados a la caracterización, dando un enfoque a las cadenas de abastecimiento citrícola que corresponde al caso de estudio que se presenta en este documento.

5.1 MACROCARACTERIZACIÓN

En la tabla 5, se describen los elementos más importantes relacionados con las actividades agrícolas desde cada una de los aspectos macro definidos.

Tabla 5: *Aspecto de la macro-caracterización.*

INFORMACIÓN	
POLÍTICO	<p>En la agricultura, los pequeños agricultores juegan un papel sumamente importante para el pleno desarrollo de las actividades agrícolas en el mundo, sin embargo, su papel ha estado limitado por ciertas circunstancias que afectan su desarrollo como la pobreza, el desempleo, la falta de ayuda del estado, los pocos créditos otorgados para el desarrollo agrícola, la estabilidad de los precios entre otros.</p> <p>En el plan de acción para el 2017, publicado por el ministerio de agricultura y desarrollo rural (2017), se tiene como meta implementar 14.500 proyectos integrales de fortalecimiento de capacidades productivas del pequeño productor. En este orden de ideas, es claro el apoyo que brinda el gobierno Colombiano al sector de la agricultura familiar, esto representa una fuerte oportunidad para liderar proyectos para beneficiarlos.</p>
AMBIENTAL	<p>La agricultura puede generar diversos impactos entre ellos: el deterioro por insumos sintéticos, mal manejo del agua, la contaminación de agroquímicos u otros.</p> <p>El uso intensivo de plaguicidas debido a su rápida acción ha provocado mayores controles en la seguridad alimentaria y salud pública, además del costo ambiental ya que tiene efectos sobre la vida silvestre que causa una pérdida de la biodiversidad, provocando una reducción de las poblaciones de fauna y flora. Otra consecuencia es la degradación del suelo con la pérdida de la fertilidad, la salinización, la erosión causando que la capacidad productiva disminuya.</p> <p>Adicionalmente, se agregan las emisiones generadas por el empleo de combustibles fósiles expulsando contaminantes atmosféricos como el dióxido de carbono, monóxido de carbono, bióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, metano, amonio y ozono.</p> <p>El sector agrícola en Colombia no será ajeno a los efectos del cambio climático, para el país se espera para el año 2050 unos aumentos significativos de la temperatura, precipitaciones más erráticas y una mayor prevalencia de las plagas y enfermedades.</p>
SOCIAL	<p>En la actualidad, existe un amplio acuerdo acerca de la importancia que reviste la agricultura familiar en la seguridad alimentaria, generación de empleo agrícola, mitigación de la pobreza, conservación de la biodiversidad y tradiciones culturales (Salcedo & Guzmán, 2014). La producción agrícola depende del trabajo de la familia, a cambio de su esfuerzo, reciben comida, refugio y apoyo en tiempos difíciles de enfermedad y vejez (Toulmin & Guéye, 2003). Se clasifican como pequeños productos a las familias agrícolas que tiene estructuras de granjas que van desde 0,15 hectáreas de tierra hasta menos de 2 hectáreas (Graham, 2012).</p> <p>Otra tendencia que se puede evidenciar en los hogares rurales, es el bajo nivel de escolaridad. De acuerdo con Tovar (2013), a 2012, la pobreza en el sector rural era del 46,8%, frente al 28,4 % del área urbana; el 84,9 % de la población campesina registraba bajo logro educativo; el analfabetismo era del 26,3 % y el 93 % no tenía empleo formal.</p> <p>Los cultivos hortofrutícolas tropicales son intensivos en el uso de mano de obra, tanto en la producción como en la postcosecha y comercialización; son el mayor generador de empleo rural, con cerca de 1.700.000 personas ocupadas (Lopera et al, 2009).</p> <p>Según la ONU (2017), aproximadamente 1 de cada 9 personas en la Tierra no disponen de alimentos suficientes para llevar una vida saludable y activa. El 12,9% de la población de los países en desarrollo está subalimentada.</p>
ECONÓMICO	<p>La agricultura es el sector que más empleo produce en todo el planeta y representa la forma de vida del 40% de todas las personas en el mundo y constituye la mayor fuente de ingresos y trabajo en las zonas rurales.</p> <p>Los frutales generan en promedio 0.64 empleos directos por hectárea, y 2.3 indirectos en actividades como la cosecha, clasificación, distribución de la fruta en puertos, aeropuertos, galerías, tiendas, restaurantes, centrales de abastos, supermercados, instituciones y detallistas, así como en los procesos de transformación agroindustrial y en las actividades relacionadas con la exportación (Viceministro de ambiente, 2009).</p> <p>Vallejo (2007) indicó que los cultivos de hortalizas se caracterizan por presentar cultivos dispersos de tamaño pequeño (1.5-10 hectáreas), con uso intensivo de mano de obra y de los recursos, altos costos de producción, carencia de tecnología apropiada, manejo deficiente de la pos cosecha, entre otros aspectos. Encontrando que la distribución dispersa y volúmenes pequeños de la producción estimulan la presencia de intermediarios e incrementan los precios de los productos que son entregados al consumidor (Viceministro de ambiente, 2009).</p> <p>En Colombia los cítricos, después del banano, son los frutales de mayor importancia económica, presentando un rendimiento de 13,53 ton/ha en el año 2012. Su cadena abarca los productos en su fase primaria tales como naranjas, limones, limas, mandarinas y toronjas, además de una serie de productos asociados a la fase industrial como: jugos, concentrados, néctares, entre otros (Meek & Aldana, 2000).</p>

Fuente: Adaptado de “macrocaracterización y microcaracterización de la cadena de abastecimiento. Recopilación teórica”, de Peña et al, 2017.

Algunos de los aspectos más relevantes identificados son los siguientes: el fortalecimiento de capacidades productivas de los pequeños productores, la necesidad de mitigar circunstancias como la pobreza, el desempleo y ayuda económica; los impactos generados durante las actividades agrícolas por insumos, mal manejo de agua, contaminación por agroquímicos y por la utilización de combustibles fósiles. En lo referente a lo social se describe la alta implementación de mano de obra, además se evidencia el bajo nivel de escolaridad y empleo formal para el sector rural. Finalmente, respecto a la perspectiva económica se halló un uso intensivo de los recursos, altos costos de producción, carencia de tecnología apropiada y manejo deficiente de la poscosecha. Se encuentra un particular interés en las actividades relacionadas con los pequeños productores agrícolas, lo cual es muy pertinente con la cadena citrícola objeto de estudio.

A continuación se hace una breve descripción del estado de la cadena de abastecimiento de cítricos a nivel mundial y nacional.

SITUACIÓN DE LA CADENA DE CÍTRICOS A NIVEL MUNDIAL:

Más de la mitad de la producción de cítricos se concentra en el hemisferio norte, y el resto se distribuye mayormente entre 5 países del hemisferio sur. La producción en el 2010 fue liderada por China, Brasil y E.E.U.U. Sin embargo, existen algunos factores que limitan la competitividad del sector, tales como la falta de escalas comerciales significativas (generación de volumen de oferta constante), la alta dispersión geográfica de la producción, la falta de gestión empresarial y un pobre desarrollo tecnológico (Corporación Universitaria Lasallista, 2012).

Martínez et al (2005) afirma que “los cítricos son cultivos permanentes y en general tienen alta adaptabilidad a diversas condiciones climáticas, facilitando su cultivo en un gran número de países, aunque las regiones productoras por excelencia han

sido localizadas en el continente americano y en el occidente del continente europeo”.

Según la secretaría de agricultura y desarrollo rural de Antioquia (2012), en general se puede decir que la producción de cítricos de los países productores se distribuye de la siguiente forma: El 60% de la producción se dedica al consumo interno, el 28% se exporta como jugos y el 12% se exporta como fruta fresca.

SITUACIÓN DE LA CADENA DE CÍTRICOS A NIVEL NACIONAL (COLOMBIA):

Según el estudio de la Corporación Universitaria Lasallista (2012), la geografía colombiana presenta condiciones favorables para el cultivo de los cítricos. A pesar de las ventajas comparativas, aún falta gestión, desarrollo tecnológico y asociatividad para generar competitividad. Dentro de los problemas alrededor de los cultivos cítricos está la deficiente selección de áreas, el escaso número de variedades, las dificultades en el manejo fitosanitario y los altos costos por uso de agroquímicos y mano de obra.

En Colombia el área sembrada en cítricos es de aproximadamente 78.531 has y con una producción de 2.061.6500 ton (Ministerio de Agricultura, 2016).

Según la secretaría de agricultura y desarrollo rural de Antioquia (2012) las principales zonas de producción son Occidente (Antioquia, Caldas, Quindío, Valle del Cauca y Risaralda), Centro (Tolima, Huila, Cundinamarca), Llanos Orientales (Meta, Casanare), Centro Oriente (Boyacá, Santander y Norte de Santander), Costa Atlántica (Bolívar, Córdoba, Cesar, Magdalena), Sur (Cauca, Nariño) el destino de la producción Nacional se distribuye de la siguiente forma el 80% es comercializado por (Intermediarios - Centrales de abasto - Grandes superficies) y el 20% restante de exportación (Cuenca del Caribe, EEUU, Unión Europea y Ecuador).

5.2 MICROCARACTERIZACIÓN

Se presenta un estudio enfocado a las cadenas de suministro frutícolas, tanto en Colombia como en el Valle del Cauca, donde se toman los aspectos más específicos que están relacionados con el funcionamiento, distribución y comercialización del producto. Esto se aprecia en la tabla que se muestra a continuación.

Tabla 6: *Aspecto de la micro-caracterización.*

INFORMACIÓN	
TECNOLÓGICO	<p>El eslabón de la poscosecha puede presentar dificultades en el desarrollo citrícola, por su deficiente selección, clasificación y almacenamiento: mala calidad externa de la fruta; insuficiente tecnología para mejorar la presentación y la gran cantidad de desechos y pérdidas.</p> <p>Las problemáticas priorizadas en la cadena citrícola es para el área de producción tienen que ver con la poca disponibilidad de variedades y materiales mejorados, así como sus altos costos y bajos rendimientos. De igual forma, se observa un uso indiscriminado de agroquímicos y el manejo inadecuado de plagas.</p> <p>Con respecto a la poscosecha e industria, se identifican ciertas dificultades como la poca infraestructura para un adecuado manejo de la poscosecha, centros de producción distantes de los puertos y la mala logística en los mismos. Además, se aprecia una falta de homogeneidad y estandarización del producto, altas pérdidas poscosecha, ausencia de cadena de frío, poco valor añadido (empaques, presentación), falta de implementación de técnicas de prolongación de la vida útil de los productos cosechados y deficiente inteligencia de mercados.</p> <p>En Colombia se estiman pérdidas entre el 12% y 25% del total de la producción, donde la manipulación y las condiciones de almacenamiento no son las más adecuadas y se dispone de muy baja tecnología.</p> <p>Aproximadamente 30-60% de pérdidas se registran anualmente durante las temporadas de cosecha máximas debido a la falta de instalaciones de almacenamiento y proceso. Ratificando de esta manera que la cadena de suministro citrícola presenta importantes fallas en el uso de la tecnología en las diferentes etapas.</p>
APRENDIZAJE	<p>La dependencia a la producción y las épocas de cosecha:</p> <p>La producción se presenta en el Eje Cafetero en los meses de mayo a junio y octubre y diciembre; en los Llanos Orientales la cosecha se da en la época de octubre a febrero y julio y agosto; en Santander, de diciembre a enero y mayo a junio; y en la Costa Atlántica, de marzo a junio (DANE, 2016).</p>
COMERCIAL	<p>Características de los procesos en la cadena de abastecimiento:</p> <p>Transporte: El transporte de fruta fresca debe tener en cuenta los factores de conservación de la fruta, como lo mencionan Gonzáles & Rojas (2011), que la temperatura y la humedad relativa son los principales factores de control en la conservación de la vida útil de fruta fresca. Su control se traduce en menor desarrollo de patógenos y en un ritmo adecuado de respiración de la fruta.</p> <p>Distribución: Los principales canales de comercialización en Colombia y el Valle del Cauca para los productos perecederos son las plazas mayoristas, que son canales indirectos y largos, puesto que la fruta que llega es comprada en el cultivo por un acopiador rural quien dispone de su propio medio de transporte para trasladarla a la plaza regional, donde es comprada por el intermediario mayorista para venderla a los detallistas. En todos los casos el pago se hace en el momento de la compra (Asocitricos et al., 2002). Son variados los canales de distribución para los comercializadores frutícolas del Valle del Cauca, según (Cámara de Comercio de Bogotá, 2016), al revisar los canales de distribución se tiene que los minimercados logran una participación del 23 %, seguida por tiendas con el 21 %, grandes cadenas con el 18 % y nuevos formatos (D1, Cooratiendas, Zapatoca, entre otras), con el 14 %.</p> <p>Materiales: Los porcentajes de costos más elevados en los cítricos se encuentran sujetos a los precios de la semilla y a los costos necesarios para el mantenimiento de las plantas, sin embargo, este primer costo se considera una inversión, ya que representa un alto costo inicial, estos no se vuelven a generar más adelante (Corporación Universitaria Lasallista, 2012).</p>

Fuente: Adaptado de “macrocaracterización y microcaracterización de la cadena de abastecimiento. Recopilación teórica”, de Peña et al, 2017.

En la tabla 6 se reconocieron los componentes que influyen directamente en las actividades, tales como: la deficiente selección, clasificación y almacenamiento, provocando mala calidad de la fruta y gran cantidad de desechos y pérdidas; altos costos y bajos rendimientos; y uso indiscriminado de agroquímicos y plaguicidas. En la parte de la poscosecha se encontraron aspectos importantes como graves problemas en la logística, falta de estandarización del producto, altas pérdidas poscosecha, poco valor añadido y deficiente inteligencia de mercado. Otros elementos importantes son el bajo nivel de precios y el daño del producto por agentes externos. Con respecto al aspecto comercial, la distribución se realiza por medio de un acopiador rural el cual transporta la fruta a una plaza regional.

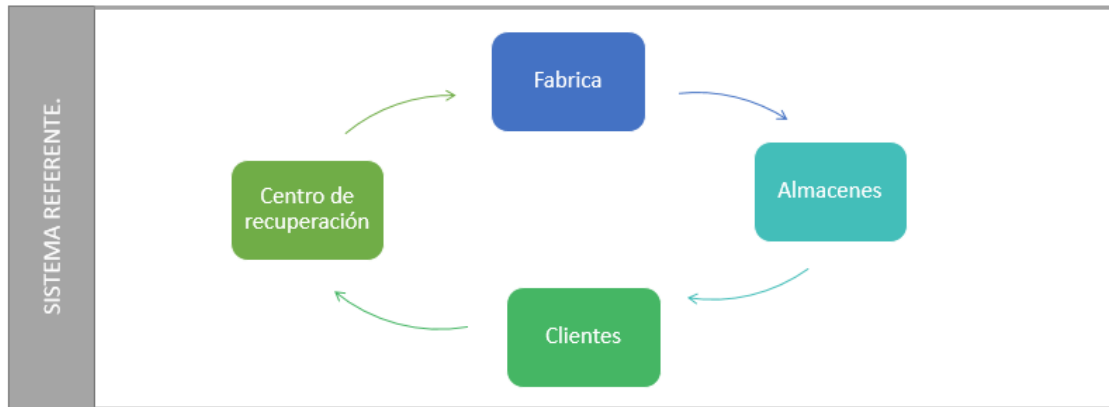
En particular se estima que el Valle del Cauca es el segundo productor en el país con unas 600.000 toneladas al año de frutas, en las que prevalecen los cítricos, la piña, uva, papaya y banano y unas 76.000 toneladas de hortalizas, según datos de la Secretaría de Agricultura Departamental citado por El País (2017).

6. MODELO REFERENTE.

Para el estudio de la sostenibilidad en una cadena de abastecimiento frutícola, se ha tomado como referencia el trabajo presentado por Mota, Gomes, Carvalho y Barbosa (2015), quienes abordan un problema de sostenibilidad en una red de distribución de baterías de ciclo cerrado.

El trabajo se desarrolla en una cadena de abastecimiento de cuatro eslabones conformado por fábrica, almacenes, clientes y centros de recuperación (Ver figura 3).

Figura 3: *Eslabones del sistema referente.*



Fuente: Adaptado de “Towards supply chain sustainability: economic, environmental and social design and planning”, Mota et al, 2015, Journal of Cleaner Production, p 17.

Este trabajo busca responder a la pregunta ¿Cómo integrar la sostenibilidad en el diseño y planificación de la cadena de suministro?, donde se minimicen los costos, el impacto ambiental y maximice el beneficio social. Para dar solución al problema, se emplea la programación lineal entera mixta, asimismo se realiza un análisis del ciclo de vida mediante la aplicación del software Simapro y la metodología Recipe para abordar los impactos ambientales. En la parte social, se utiliza un factor regional del GRI (Global reporting initiative) relacionado con el empleo en las

regiones menos desarrolladas. Por otro lado, en el pilar económico se tienen en cuenta los costos logísticos. Finalmente, se integran las tres funciones objetivo en una solución única utilizando el método ϵ - constraints.

A continuación se presenta la nomenclatura utilizada y el desarrollo del modelo matemático del artículo referente.

CONJUNTOS E INDICES

- I, J = Conjunto de entidades indexados por el subíndice i, j .
- M, \dot{M} = Conjunto de productos indexados por el subíndice m, \dot{m} .
- K = Conjunto de vehículos/medios de transporte indexados por el subíndice k .
- T = Periodo de tiempo indexado por el subíndice t .

ENTIDADES (CONJUNTOS INDUCIDOS)

- I_f = Ubicación de la fábrica.
- I_a = Posibles ubicaciones para los almacenes.
- I_c = Ubicación de los clientes.
- I_r = Ubicaciones posibles para los centros de recuperación.

PARÁMETROS

- C_{fi} = Costo fijo de la entidad i . [\$ / tiempo]
- CS_{mit} = Costo unitario del producto m adquirido en la entidad i para el período t . [\$ / unidad]
- Ct_{ij} = Costo de transporte, por kilómetro, de la entidad i a la entidad j . [\$ / km]

- d_{ij} = Distancia entre la entidad i y la entidad j , en kilómetros. [Km]
- Cp_{mit} = Costo unitario del producto m colectado en la entidad i , en el período t . [\$/ unidad]
- Chr_i = Costos de los recursos humanos en la entidad i . [\$/ tiempo]
- $rp_{m\dot{m}}$ = relación entre producto m y \dot{m} .
- msc_i = Capacidad máxima de almacenamiento de la entidad i . [Unidades]
- mst_i = Nivel mínimo de stock en la entidad i . [Unidades]
- Cv_{ij} = Capacidad de cada vehículo que opera entre la entidad i y la entidad j . [Unidades]
- I_{ac} = Impacto ambiental para la actividad a (por ejemplo, producción, transporte) en la categoría de impacto c .
- A_i = Área de la entidad i . [m^2]
- w_i = Número de trabajadores en la entidad i .
- μ_i = factor regional en la entidad i .
- $BigM$ = Número muy grande.
- mk = Número máximo de kilómetros recorridos por periodo micro. [Km]
- mw = Número máximo de almacenes.

VARIABLES

- X_{mijt} = Cantidad de producto m servida por la entidad i a la entidad j , en el tiempo t . [Unidades/ tiempo]
- S_{mit} = Cantidad de producto m almacenado en la entidad i , en el tiempo t . [Unidades/ tiempo]
- Y_i = Variable Binaria. 1 si se abre la entidad (almacenes) i , 0 de lo contrario.

- Z_{ijt} = Número de viajes de la entidad i a la entidad j , en el tiempo t .
[Número de viajes/ tiempo]

MODELO MATEMÁTICO

En el artículo referente en el modelo matemático abordan por separado cada componente de la sostenibilidad, maximizando el beneficio social y minimizando los costos logísticos y el impacto ambiental que genera la empresa.

A continuación, se describe como fue abordado cada pilar y se finaliza con la explicación del modelo multi-objetivo.

PILAR ECONÓMICO.

$$\begin{aligned} \text{Min Cost} = & \sum_{i \in I_a} C f_i Y_i + \sum_{mij:(m,i,j) \in F_s} \sum_{t \in T} C S_{mit} X_{mijt} \\ & + \sum_{ij:(i,j) \in A_{own}} \sum_{t \in T} c t_{ij} d_{ij} Z_{ijt} + \sum_{mij:(m,i,j) \in F_{out}} \sum_{t \in T} c t_{ij} d_{ij} X_{mijt} \\ & + \sum_{mi:(m,i) \in \widehat{Vc}} c p_{mi} \left(\sum_{j \in I_a} \sum_{t \in T} X_{mijt} \right) + \sum_{i \in I_a} c h r_i Y_i \end{aligned}$$

La función económica tiene como objetivo la minimización de costos en la cadena de abastecimiento. Se formula como se describe a continuación:

- El primer término presenta los costes fijos de cada entidad $c f_i$ controlados por la variable binaria Y_i que es igual a 1 cuando se abre la entidad i .
- El segundo término representa los costos de materias primas adquiridos de proveedores donde $c s_{mit}$ corresponde al costo unitario del producto m adquirido en la entidad i para el período t , y X_{mijt} es una variable continua para la cantidad de producto m servida por la entidad i a la entidad j en el momento t .

- El tercer término se refiere a los costos de transporte que realiza la propia flota de la empresa y depende de parámetros como la utilización de vehículos, el precio del combustible y el mantenimiento del vehículo.
- El cuarto término está relacionado con el transporte subcontratado, que varía con los costos contratados (por kg.km), la cantidad de unidades transportadas y los kilómetros recorridos.
- El quinto término representa los costos de recolección de productos cp_{mi} de los clientes.
- El sexto y último término se refiere a los costos con recursos humanos chr_i que resultan de la apertura de una entidad determinada.

PILAR AMBIENTAL.

El impacto ambiental se determina utilizando ReCiPe 2008 (Goedkoop et al., 2009 citado por Mota et al 2015). La cadena de suministro como sistema se usa como unidad funcional. Esto significa que se realiza un análisis del ciclo de vida de los productos, el modo de transporte y las entidades (almacenes y fábricas) existentes dentro de los límites definidos de la cadena de suministro que se estudia.

El inventario del ciclo de vida (LCI) de cada producto, modo de transporte y entidad se recupera de la base de datos de Ecoinvent (evaluada a través del software SimaPro 7.3.2). De esto resulta una lista de inventario l (por ejemplo, contaminantes, recursos agotados) y las cantidades correspondientes (ql), que se utilizan para determinar el impacto ambiental (I_{ac}) de cada actividad a (producción, transporte e instalación de entidades) en la categoría de impacto c , de acuerdo con la ecuación siguiente. Los factores de caracterización (C_{cal}) son los de la metodología ReCiPe 2008.

$$I_{ac} = \sum_l C_{acl} q_l$$

Los impactos ambientales resultantes se usan como datos de entrada (parámetros) para el modelo matemático. Se calcula el impacto ambiental global de producción (P_c), transporte (T_c) e instalación de entidades (E_c) para cada categoría de impacto, de acuerdo con las ecuaciones que se muestran a continuación:

$$P_c = \sum_{t \in T} \sum_{mij: (m,i,j) \in F} I_{mc} X_{mijt}$$

$$T_c = \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sum_{ij: (i,j) \in I} I_{kc} Z_{kijt} d_{ij}$$

$$E_c = \sum_{i \in I} I_{ic} A_i Y_i$$

Posteriormente se obtiene una única calificación (NI) utilizando los factores de normalización y / o ponderación (η_c) de la metodología ReCiPe 2008, como se muestra en la ecuación siguiente. La calificación (Ni) actúa como la función objetivo del modelo que debe minimizarse.

$$\text{Min } Ni = \sum_c (P_c + T_c + E_c) n_c$$

PILAR SOCIAL

Los autores definen un indicador de beneficio social que prefiere la creación de empleo en las regiones menos desarrolladas y que considera los impactos negativos de no tener empleo, partiendo de dos subcategorías sociales de Global Reporting Initiative (GRI), las prácticas laborales y el trabajo decente. El indicador de beneficio social (SB), es definido como sigue:

$$SB = \sum_{i \in I} W_i \mu_i Y_i$$

Donde:

- w_i es el número de trabajos creados en la región i y
- μ_i representa un factor regional, que puede asumir diferentes valores de acuerdo con el propósito del estudio.

La tasa de desempleo, la densidad de población y la distribución del ingreso son ejemplos de posibles factores regionales. El indicador de Beneficio Social puede ser introducido en el modelo para ser maximizado o minimizado, según la definición del factor regional.

ENFOQUE MULTIOBJETIVO.

Para la solución los autores utilizan el método ε -constraint que busca minimizar los costos, minimizar el impacto ambiental y se maximiza el beneficio social, como se describe a continuación:

$$\min (f_1(x), f_2(x)) \wedge \max f_3(x) \text{ st } x \in S,$$

Donde:

- x es el vector de las variables de decisión,
- $f_1(x)$, $f_2(x)$ y $f_3(x)$ son las funciones objetivo (costo, impacto ambiental y beneficio social, respectivamente) y
- S es la región factible.

El método ε -constraint permite optimizar una de las funciones objetivo utilizando las otras como restricciones. Al variar los límites de restricción, se obtienen puntos que son Pareto eficientes definiendo un frente de Pareto discretizado. La estructura del modelo es la siguiente:

$$\text{Min } f_1(x)$$

$$S.t. \quad f_2(x) \leq f_2^{\min}(x) + k\Delta\varepsilon_2,$$

$$f_3(x) \geq f_3^{\min}(x) + k\Delta\varepsilon_3,$$

$$x \in S,$$

$$\text{Con } k = 0, \dots, n \text{ y } \Delta\varepsilon_i = \frac{f_i^{\max} - f_i^{\min}}{n}, i = 2, 3.$$

Para el cálculo del rango de las funciones objetivo sobre el conjunto eficiente, se realiza una optimización lexicográfica. Utilizan un método que consiste en transformar las limitaciones objetivas de la función a igualdades incorporando explícitamente las variables de holgura o exceso (s_2 y s_3) y penalizando estas nuevas variables en la función objetivo. El modelo anterior se convierte en:

$$\begin{aligned} & \text{Min } (f_1(x) + \text{eps} \times (s_2 + s_3)) \\ & \text{S. t. } f_2(x) + s_2 = f_{2_{\min}}(x) + k\Delta\varepsilon_2, \\ & f_3(x) - s_3 = f_{3_{\min}}(x) + k\Delta\varepsilon_3, \\ & x \in S \text{ y } s_i \in R^+, \end{aligned}$$

Dónde:

- eps es un número suficientemente pequeño (usualmente entre 10^{-3} y 10^{-6} , de modo que no afecta a la función objetivo).

RESTRICCIONES:

- **Limitaciones de flujo de material:** Esta restricción asegura que, en cualquier período de tiempo, para cualquier entidad y para cada producto, el flujo entrante debe ser igual al flujo saliente más la diferencia entre las existencias y las nuevas retenidas teniendo en cuenta la relación entre diferentes productos.

$$\begin{aligned} S_{mi(t-1)} + \sum_{\bar{m}j: (\bar{m}, j, i) \in F} rp_{m\bar{m}} X_{\bar{m}jit} &= \sum_{\bar{m}j: (\bar{m}, j, i) \in F/F_s} rp_{m\bar{m}} X_{\bar{m}jit} + S_{mit}, (m, i) \\ &\in V_{nos} \wedge t \in T \quad (1) \end{aligned}$$

- **Limitaciones de demanda y retorno:** La ecuación (2) establece una restricción con respecto a la demanda para cada período. La restricción (3) modela las devoluciones de clientes. El volumen total de devoluciones disponibles en cada cliente depende de la cantidad suministrada.

$$\sum_{j: (m, i, j) \in F} X_{mijt} = pd_{mit}, (m, i) \in \tilde{V}_c \wedge t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{j:(m,i,j) \in F} \sum_{t \in T} x_{mijt} \leq \sum_{\bar{m}j:(\bar{m},j,i) \in F} \sum_{t \in T} rp_{m\bar{m}} x_{\bar{m}ijt}, (m,i) \in \tilde{V}_c \wedge t \in T \quad (3)$$

- **Limitaciones de capacidad:** La restricción (4) establece límites máximos en las capacidades de almacenamiento total ($msci$) y la restricción (5) establece el nivel mínimo de stock ($msti$) en la fábrica. La restricción (6) limita la cantidad de productos a transportar, de acuerdo con la capacidad del vehículo ($cvij$). La restricción (7) determina el número necesario de desplazamientos entre cada par de entidades de acuerdo con la capacidad del vehículo.

$$\sum_{m:(m,i) \in V_{nos}/\tilde{V}_c} S_{mit} \leq msc_i Y_i, i \in I \wedge t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{m:(m,i) \in \tilde{V}_f} S_{mit} \geq mst_i Y_i, i \in I_f \wedge t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{m:(m,i,j) \in F} x_{mijt} \leq cv_{ij} Z_{ij}t, (i,j) \in A \wedge t \in T \quad (6)$$

$$Z_{ij}t \leq \sum_{m:(m,i,j) \in F_{out}} \frac{x_{mijt}}{cv_{ij}} + 1, (i,j) \in A_{out} \wedge t \in T \quad (7)$$

- **Limitaciones operacionales:** La ecuación (8) limita el número de viajes entre cada par de entidades. La restricción (9) limita el número de kilómetros cubiertos por vehículos.

$$Z_{ijt} \leq Z_{jit}, (i,j) \in (A_{r1} \cup A_{r2}) \wedge t \in T \quad (8)$$

$$\sum_j Z_{ijt} d_{ij} \leq mk, (i,j) \in A_{f2} \wedge t \in T \quad (9)$$

- **Limitaciones de flujo:** Las limitaciones (10) y (11) limitan la ocurrencia de flujos entre instalaciones abiertas solamente.

$$Z_{ijt} \leq BigM \cdot Y_i, (i,j) \in (A_{f1} \cup A_{r2}) \wedge t \in T \quad (10)$$

$$Z_{ijt} \leq BigM \cdot Y_j, (i,j) \in (A_{r1} \cup A_{r2}) \wedge t \in T \quad (11)$$

- **Limitación de almacenes:** La limitación (12) limitan el número de almacenes que se pueden abrir.

$$\sum_i Y_i \leq mw, i \in I_a \quad (12)$$

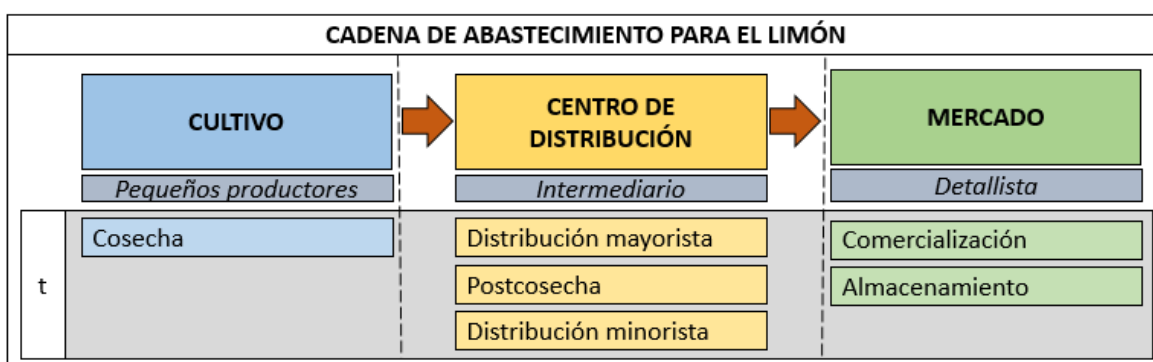
- **Restricciones Lógicas**

$$X_{mijt}, S_{mit} \in \mathbb{R}_0^+; Y_i \in \{0, 1\}; Z_{ijt} \in \mathbb{N} \quad (13)$$

7. EVALUACION DEL SISTEMA OBJETO DE ESTUDIO FRENTE AL REFERENTE.

En este capítulo se plantea la comparación entre la situación actual que presenta la cadena citrícola objeto de estudio, con el fin de evaluar las similitudes y diferencias encontradas con respecto al sistema referente del artículo base.

Gráfica 2: Actividades desarrolladas en la cadena de abastecimiento objeto de estudio.



Fuente: Autores.

En el gráfico 2, se muestra la cadena objeto de estudio de tres eslabones y se incluyen las actividades de forma general desarrolladas por cada entidad. En el cultivo se considera la cosecha como la recolección de la fruta; en el siguiente eslabón se contemplan la distribución y postcosecha que incluye las actividades de limpieza, clasificación, almacenamiento y empaque; en el eslabón final se abarca la comercialización y almacenamiento.

En la siguiente tabla se presenta una breve comparación entre el sistema objeto de estudio y el referente, lo cual permite tener un mejor entendimiento de cómo se desarrolla el modelo.

Tabla 7. Comparación entre el sistema referente y el objeto de estudio.

DIFERENCIAS Y SIMILITUDES	
SISTEMA REFERENTE	SISTEMA OBJETO DE ESTUDIO
Es una cadena de suministro de ciclo cerrado compuesta por 4 eslabones, ver figura 3.	Es una cadena de suministro compuesta por 3 eslabones y no es de ciclo cerrado, ver figura 4.
El producto que circula en la cadena es baterías.	El producto que fluye en la cadena es una fruta (alimento perecedero).
Un modelo genérico de programación matemática multi-objetivo para el diseño y planificación de cadenas de suministro, integrando las tres dimensiones de la sostenibilidad. Programación Lineal Entera Mixta (MILP).	Un modelo de programación lineal entera mixta multi-objetivo que involucra los tres objetivos de sostenibilidad.
El pilar económico de la sostenibilidad se aborda considerando los costos de la cadena de suministro.	En pilar económico de la sostenibilidad se aborda considerando los costos logísticos de la cadena.
Tiene como objetivo, determinar la red de la cadena de suministro así como las decisiones de planificación que minimicen los costos, minimicen el impacto ambiental y maximicen el beneficio social, en una solución de compromiso.	Tiene como objetivo determinar la red de la cadena, contemplando los enfoques sostenibles, mediante la minimización de costos, reducción del impacto ambiental y la maximización del beneficio social.
Entre los datos de entrada se consideran: capacidades, niveles de stock, costos de inversión y de producción, factores ambientales, demandas y costos relacionados con el transporte, áreas, mano de obra.	Entre los datos de entrada se podrían considerar: costos de producción, de procesamiento, de daño en el producto, de mano de obra, de transporte y de compra; además, factores ambientales, distancias, capacidades y demanda.
De acuerdo a la naturaleza del modelo se tienen en cuenta restricciones de flujo de materiales, restricciones de demanda y retorno, limitaciones de capacidad (tanto de vehículos como de instalaciones) y restricciones operativas como la distancia máxima recorrida por período de tiempo.	De acuerdo a la naturaleza del modelo se podrían tener en cuenta restricciones de flujo de materiales, restricciones de demanda, de distancia, de rendimientos y limitaciones de capacidad.
En el aspecto ambiental se abarcan 3 factores de impacto ambiental: a cada instalación, de las unidades de transporte y por producto.	En el aspecto ambiental se podría abarcar el impacto ambiental del transporte y del producto
Se manejan 3 subíndices para productos, instalaciones y medios de transportes.	Se contemplaría 4 subíndices para productores individuales, centro de acopio, intermediarios y detallistas.
Consideran un centro de recuperación.	La cadena no incluye la recuperación del producto, todo se desecha.
Variables: cantidad de producto enviado, almacenado, apertura de nuevas instalaciones y números de viajes a realizar entre entidades.	Variables: Cantidad de producto enviado, número de viajes a realizar, número de personas a contratar y cantidad de hectáreas.

DIFERENCIAS Y SIMILITUDES	
SISTEMA REFERENTE	SISTEMA OBJETO DE ESTUDIO
Periodos de tiempo y volúmenes de devoluciones.	Es posible considerar volúmenes de desperdicio y periodos de tiempo.
Costos fijos, de MP, de transporte: consumo de vehículos, el precio del combustible y el mantenimiento del vehículo. Costos de transporte subcontratado, costos de recuperación de productos y por recurso humano.	No se considera el mantenimiento de vehículo, ni los costos de transporte subcontratado, ni de recuperación de productos.
Se realiza un análisis de ciclo de vida sobre los productos, el modo de transporte y las entidades (almacenes y fábricas).	No se realiza un análisis de ciclo de vida.
Para calcular los impactos ambientales utilizan los factores de caracterización (Caci) de la metodología ReCiPe 2008. Los cuales se ponderan y normalizan como una puntuación individual para la minimización.	Para calcular los impactos ambientales se prodiga utilizar un indicador de emisiones.
El indicador de beneficio social (SB) tenido en cuenta es la generación de empleo, al ser este uno de los objetivos de la Comisión Europea para el periodo 2014-2020. Junto con el crecimiento económico y el desarrollo regional.	El indicador de beneficio social (SB) que se podría tendrá en cuenta es la generación de empleo.
Se manejan 7 tipos de productos de distintos pesos y tamaños.	Se maneja un solo producto.
Consideran simultáneamente actividades de producción, almacenamiento, recolección y reciclaje.	Consideran actividades de producción, transporte y comercialización.
Diferentes modos de transporte integrados y flexibles orientados a la satisfacción del cliente.	Considera un modo de transporte a cargo del intermediario.
Una fábrica, 12 almacenes y 2300 clientes que se agrupan en 237, distribuidos a lo largo de Portugal.	66 productores, 7 intermediarios y 4 detallistas.
Posee su propia flota de vehículos	Los intermediarios realizan los transportes y tienen sus propios vehículos.

Fuente: Autores.

La cadena objeto de estudio presenta similitudes frente al referente como el flujo del producto; actividades en común como la producción, el transporte y la comercialización. Además, el modelo que se va presentar pretende equilibrar los tres pilares de la sostenibilidad, así como se aborda en el modelo referente. Por otro lado, entre las diferencias encontradas están que se manejan productos distintos, el número de entidades en cada eslabón, el tipo de cadena de suministro, el horizonte de tiempo del estudio y las metodologías de solución para el objetivo social y ambiental.

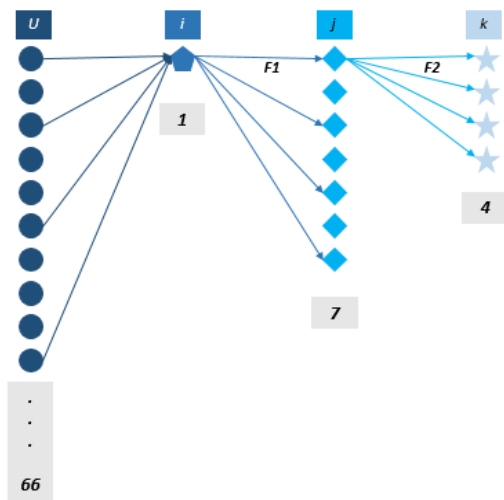
8. MODELO MATEMÁTICO PROPUESTO.

Una vez identificados las características del modelo referente y el potencial de adaptación a las características propias del sistema objeto de estudio, se propone un modelo matemático que responda a la siguiente pregunta: ¿Cómo diseñar una cadena de suministro sostenible frutícola?, que minimice los costos y el impacto ambiental, y maximice el beneficio social.

El modelo propuesto es el siguiente:

La cadena de abastecimiento se concibe de 4 eslabones, el primero conformado por 66 productores, el segundo por un centro de acopio, el tercero por 7 intermediarios y el cuarto por 4 detallistas. Ver gráfica 3.

Gráfica 3: *Grafo de nodos contemplados en el modelo.*



Fuente: Autores.

Se definen los siguientes componentes del modelo:

CONJUNTOS

- I = Centro de acopio indexados por el subíndice i
- J = Conjunto de intermediarios indexados por el subíndice j
- K = Conjunto de detallistas indexados por el subíndice k
- U = Conjunto de tipo de productores individuales indexados por el subíndice U

VARIABLES

Tabla 8: Variables del modelo matemático.

#	VAR.	DESCRIPCIÓN	UNIDAD
1	X_{ij}	Cantidad de producto a enviar de la entidad i a la entidad j	[Kg/Sem]
2	Y_{jk}	Cantidad de producto a enviar de la entidad j a la entidad k	[Kg/Sem]
3	Z_{ij}	Variable Entera. Número de viajes de la entidad i a la entidad j	[Viajes/Sem]
4	ZZ_{jk}	Variable Entera. Número de viajes de la entidad j a la entidad k	[Viajes/Sem]
5	W	Cantidad total de hectáreas activadas	[Ha]
6	S	Variable Entera. Cantidad de personas necesarias en el centro de acopio	[#Pers/Sem]
7	SS_j	Variable Entera. Cantidad de personas necesarias en el intermediario j	[#Pers/Sem]
8	SSS_k	Variable Entera. Cantidad de personas necesarias en el detallista k	[#Pers/Sem]
9	B_u	Variable binaria. 1 si productor u envía a i , 0 de lo contrario	NA

Fuente: Autores.

PARÁMETROS

Tabla 9: *Parámetros del modelo matemático.*

#	PAR.	DESCRIPCIÓN	UNIDAD
1	CMP	Costo de mano de obra en el centro de acopio	[\$/Pers]
2	CP	Costo de producción en el centro de acopio	[\$/Kg]
3	CI_j	Costo de procesamiento del intermediario j	[\$/Kg]
4	CMO_j	Costo de mano de obra en el intermediario j	[\$/Pers]
5	CT	Costo de transporte	[\$/Km]
6	CD_k	Costo de mano de obra o de recepción en el detallista k	[\$/Pers]
7	CDA_{ij}	Costo por daño en el producto durante el transporte desde el productor i hasta el intermediario j a cargo del intermediario	[\$/Kg]
8	CDF_{jk}	Costo por daño en el producto durante el transporte desde el intermediario j hasta el detallista k a cargo del intermediario (Costo flete + costo del producto + costo de procesamiento en el intermediario)	[\$/Kg]
9	RA_u	Rendimiento para cada productor u	[Kg/Ha* Sem]
10	RB	Sumatoria de los rendimientos de cada productor u	[Kg/Ha* Sem]
11	RC	Rendimiento máximo	[Kg/Ha* Sem]
12	RD	Rendimiento mínimo	[Kg/Ha* Sem]
13	CN	Capacidad de producción en el centro de acopio	[Kg/Sem]
14	CRI_j	Capacidad de despacho en el intermediario j	[Kg/Sem]
15	CR_k	Capacidad de recepción en el detallista k	[Kg/Sem]
16	DD_k	Demanda del detallista k	[Kg/Sem]
17	DI_j	Demanda del intermediario j	[Kg/Sem]
18	CV_j	Capacidad del vehículo del intermediario j	[Kg/Viaje]
19	CA	Capacidad productiva de una persona promedio en el centro de acopio	[Kg/Pers*Sem]
20	CB_j	Capacidad productiva de una persona para procesar un kilo de fruta en el intermediario j	[Kg/Pers*Sem]
21	CC_k	Capacidad productiva de una persona para procesar un kilo de fruta en el detallista k	[Kg/Pers*Sem]
22	H_u	Hectáreas de cada productor u	[Ha]
23	IT_j	Impacto ambiental producido por el transporte del intermediario j	[KgCO2/Sem]
24	DPI_{ij}	Distancia recorrida desde el centro de acopio i hasta el intermediario j	[Km/Sem]

#	PAR.	DESCRIPCIÓN	UNIDAD
25	DID_{jk}	Distancia recorrida desde el intermediario j hasta el detallista k	[Km/Sem]
26	P_{ij}	Porcentaje de daño en el producto durante la distribución desde el centro de acopio i hasta el intermediario j	%
27	PP_{jk}	Porcentaje de daño en el producto durante la distribución desde el intermediario j hasta el detallista k	%
28	M	Número muy grande que representa la suma total de las distancias	[Km]
29	ES	Épsilon de la función objetivo social	[# pernas/sem]
30	EA	Épsilon de la función objetivo ambiental	[KgCO2/Sem]

Fuente: Autores.

Tal como en el modelo referente se proponen tres funciones objetivos en torno al componente económico, social y ambiental, como se presenta a continuación:

FUNCIÓN OBJETIVO DEL COMPONENTE ECONÓMICO:

En la tabla 10 se presenta la estructura de la función objetivo del componente económico del modelo.

Tabla 10: *Función objetivo 1 - Componente económico.*

ESTRUCTURA DE COSTOS	FORMULACIÓN MATEMÁTICA
A. COSTO DE PRODUCCIÓN EN EL CENTRO DE ACOPIO	$\sum_{i=1}^1 \sum_{j=1}^7 CP \cdot X_{ij}$
B. COSTO DE PROCESAMIENTO EN EL INTERMEDIARIO	$\sum_{i=1}^1 \sum_{j=1}^7 Cl_j \cdot X_{ij}$
C. COSTO DE M.O EN EL CENTRO DE ACOPIO	$CMP \cdot S$
D. COSTO DE M.O EN EL INTERMEDIARIO	$\sum_{j=1}^7 CMO_j \cdot SS_j$
E. COSTO DE M.O EN EL DETALLISTA	$\sum_{k=1}^4 CD_k \cdot SSS_k$

ESTRUCTURA DE COSTOS	FORMULACIÓN MATEMÁTICA
F. COSTO DE TRANSPORTE EN EL FLUJO 1	$\sum_{i=1}^1 \sum_{j=1}^7 CT \cdot Z_{ij} \cdot DPl_{ij}$
G. COSTO DE TRANSPORTE EN EL FLUJO 2	$\sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^4 CT \cdot ZZ_{jk} \cdot DID_{jk}$
H. COSTO POR DAÑO DEL PRODUCTO EN EL FLUJO 1	$\sum_{i=1}^1 \sum_{j=1}^7 CDA_{ij} \cdot P_{ij} \cdot X_{ij}$
I. COSTO POR DAÑO DEL PRODUCTO EN EL FLUJO 2	$\sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^4 CDF_{jk} \cdot PP_{jk} \cdot Y_{jk}$

Fuente: Autores.

FUNCIÓN OBJETIVO 1: MINIMIZAR α

$$\alpha_{min} = (A + B + C + D + E + F + G + H + I) \quad (1)$$

La función económica se expresa como la minimización de alpha Min α , representada como la sumatoria de las ecuaciones A hasta I que se presentan en la tabla superior.

- A: está compuesta por la sumatoria de los costos de producción por la cantidad de producto que se envíe en el primer flujo.
- B: corresponde a los costos de procesamiento de la fruta por la cantidad de producto en el primer flujo.
- C, D, E: representan los costos de mano de obra por las cantidades de personas requeridas en el centro de acopio, intermediario y detallista respectivamente.
- F, H: determinan los costos de transporte por las distancias recorridas entre los nodos y el número de viajes que realiza entre cada nodo del primer flujo y en el segundo flujo respectivamente.
- H e I: representan el costo por daño en el producto multiplicado por un porcentaje de daño que le ocurre a la fruta en el transporte por la cantidad de producto enviado en el primer flujo y en el segundo flujo respectivamente.

FUNCIÓN OBJETIVO DEL COMPONENTE SOCIAL:

La dimensión social de la sostenibilidad se introduce en el modelo a través de la variable de generación de empleo, teniendo en cuenta el consenso acerca de la importancia que reviste la generación de empleo agrícola (Salcedo & Guzmán, 2014). Se formula un modelo matemático que busca maximizar la creación de empleo por medio de la cantidad de flujo de producto y la capacidad productiva de la mano de obra en cada entidad, es decir, que la cantidad de fruta a enviar es proporcional al número de personas a contratar. Esto viene dado por la ecuación 2 (maximización de β), la cual está compuesta por la sumatoria de las variables que definen la cantidad necesaria de personas por eslabón, como se muestra en la tabla 11.

Tabla 11: *Función objetivo 2 - Componente social.*

ESTRUCTURA SOCIAL	FORMULACIÓN MATEMÁTICA
A. NÚMERO DE PERSONAS REQUERIDAS EN EL CENTRO DE ACOPIO	S
B. NÚMERO DE PERSONAS REQUERIDAS EN EL INTERMEDIARIO	$\sum_{j=1}^7 SS_j$
C. NÚMERO DE PERSONAS REQUERIDAS EN EL DETALLISTA	$\sum_{k=1}^4 SSS_k$

Fuente: Autores.

FUNCIÓN OBJETIVO 2: MAXIMIZAR β

$$\beta_{max} = (A + B + C) \quad (2)$$

FUNCIÓN OBJETIVO DEL COMPONENTE AMBIENTAL:

En la tabla 12 se presenta la estructura de la función objetivo del componente ambiental del modelo.

Tabla 12: *Función objetivo 2 - Componente ambiental.*

ESTRUCTURA DE AMBIENTE	FORMULACIÓN MATEMÁTICA
A. IMPACTO AMBIENTAL EN EL FLUJO 1	$\sum_{i=1}^1 \sum_{j=1}^7 Z_{ij} \cdot DPl_{ij} \cdot IT_j$
B. IMPACTO AMBIENTAL EN EL FLUJO 2	$\sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^4 ZZ_{jk} \cdot DID_{jk} \cdot IT_j$

Fuente: Autores.

FUNCIÓN OBJETIVO 3: MINIMIZAR γ

$$\gamma_{min} = (A + B) \quad (3)$$

El modelo ambiental se expresa como la minimización de gamma Min γ , la cual expresa la cantidad de emisión de dióxido de carbono causados durante la distribución del producto. Compuesta por la sumatoria de:

- A: considera el impacto ambiental generado en el flujo 1 que va desde el productor hasta cada intermediario, teniendo en cuenta las distancias recorridas y número de viajes.
- B: corresponde al mismo procedimiento que en A, pero para el flujo 2 que va del intermediario al detallista, teniendo en cuenta las distancias recorridas y número de viajes.

En ambas consideraciones se contempla un IT_j que hace referencia a un indicador Kg*CO₂ producidos por el tipo de combustible utilizado por los diferentes modos de transporte del intermediario. La misión de esta función objetivo es encontrar la mejor combinación posible para generar el menor impacto negativo por emisiones de efecto invernadero y recorrer mínimas distancias entre los nodos de la cadena.

A continuación se definen las restricciones de los modelos. Algunas de ellas son compartidas entre cada uno de ellos y otras son particulares.

RESTRICCIONES GENERALES PARA LOS MODELOS:

Tabla 13: Restricciones del modelo matemático.

ESTRUCTURA DE RESTRICCIONES	FORMULACIÓN MATEMÁTICA
1. DE RENDIMIENTOS	$\sum_{u=1}^{66} RA_u \cdot B_u \leq RB_u$
2. DE BALANCE DE NÚMERO DE HECTÁREAS	$\sum_{u=1}^{66} B_u \cdot H_u = W$
3. DE CAPACIDAD PRODUCTIVA EN EL CENTRO DE ACOPIO	$RC \cdot W \leq CN$
4. DE CAPACIDAD DE RECEPCIÓN DEL INTERMEDIARIO	$\sum_{i=1}^1 X_{ij} \leq CRI_j ; \forall j \in J$
5. DE CAPACIDAD DE RECEPCIÓN DEL DETALLISTA	$\sum_{j=1}^7 Y_{jk} \leq CR_k ; \forall k \in K$
6. DE CAPACIDAD DEL VEHÍCULO PARA EL FLUJO 1	$X_{ij} \leq CV_j \cdot Z_{ij} ; \forall i \in I, j \in J$
7. DE CAPACIDAD DEL VEHÍCULO PARA EL FLUJO 2	$Y_{jk} \leq CV_j \cdot ZZ_{jk} ; \forall j \in J, k \in K$
8. DE DEMANDA DEL INTERMEDIARIO	$\sum_{i=1}^1 X_{ij} \geq DI_j ; \forall j \in J$
9. DEMANDA DEL DETALLISTA	$\sum_{j=1}^7 Y_{jk} \geq DD_k ; \forall k \in K$
10. DE BALANCE DE MASA	$\sum_{k=1}^4 Y_{jk} = \sum_{i=1}^1 (X_{ij} - P_{ij} \cdot X_{ij}) - \sum_{k=1}^4 (PP_{jk} \cdot Y_{jk}) ; \forall j \in J$
11. DE LÍMITE MÁXIMO PARA CANTIDADES	$\sum_{j=1}^7 X_{ij} \leq RC \cdot W ; \forall i \in I$
12. DE LÍMITE MÍNIMO PARA CANTIDADES	$\sum_{j=1}^7 X_{ij} \geq RD \cdot W ; \forall i \in I$

ESTRUCTURA DE RESTRICCIONES	FORMULACIÓN MATEMÁTICA
13. DE NÚMERO DE VIAJES EN EL FLUJO 1	$\sum_{i=1}^1 Z_{ij} \leq \sum_{i=1}^1 \left(\frac{X_{ij}}{CV_j} \right) + 1 ; \forall j \in J$
14. DE NÚMERO DE VIAJES EN EL FLUJO 2	$\sum_{k=1}^4 ZZ_{jk} \leq \sum_{k=1}^4 \left(\frac{Y_{jk}}{CV_j} \right) + 1 ; \forall j \in J$
15. DE PERSONAS EN EL CENTRO DE ACOPIO	$\sum_{i=1}^1 \sum_{j=1}^7 \left(\frac{X_{ij}}{CA} \right) = S$
16. DE PERSONAS EN EL INTERMEDIARIO	$\sum_{i=1}^1 \left(\frac{X_{ij}}{CB_j} \right) = SS_j ; \forall j \in J$
17. DE PERSONAS EN EL DETALLISTA	$\sum_{j=1}^7 \left(\frac{Y_{jk}}{CC_k} \right) = SSS_k ; \forall k \in K$
18. BÁSICA DE VARIABLES CONTINUAS	$X_{ij}, Y_{jk}, W \in \mathbb{R}^+$
19. BÁSICA DE VARIABLES BINARIAS	$B_i \in \{0,1\}$
20. BÁSICA DE VARIABLES ENTERAS	$Z_{ij}, ZZ_{jk}, S, SS_j, SSS_k \in \mathbb{N}$

Fuente: Autores.

RESTRICCIÓN ESPECÍFICA PARA EL MODELO AMBIENTAL:

Debido a que los modelos matemáticos tienen funciones objetivos diferentes, fue necesario determinar una restricción especial que solo se aplica en el modelo ambiental, ver tabla 14.

Tabla 14: *Restricción especial.*

ESTRUCTURA DE RESTRICCIONES ESPECIAL	FORMULACIÓN MATEMÁTICA
21. NÚMERO DE KILÓMETROS RECORRIDOS	$\sum_{i=1}^1 Z_{ij} \cdot DPI_{ij} + \sum_{k=1}^4 ZZ_{jk} \cdot DID_{jk} \leq M ; \forall j \in J$

Fuente: Autores.

La restricción (1) expresa que la sumatoria de los rendimientos en [Kg/Ha] de cada uno de los productores que envíen producto no puede superar un rendimiento máximo global.

En (2) W debe ser igual al total de hectáreas que se van a utilizar, esto está determinado por la sumatoria de las hectáreas de los productores H_u que finalmente se activen por la variable binaria B_u

La capacidad productiva en (3), se limita con el rendimiento máximo por las hectáreas totales activadas.

Para (4) y (5) se realizan limitaciones de capacidad relacionado con almacenamiento y procesamiento del producto.

La limitación (6) y (7) se refieren a las capacidades de peso en los vehículos de los intermediarios considerados en el flujo 1 y 2.

Las restricciones (8) y (9) son necesarias para cumplir una demanda mínima de producto para el intermediario y detallista respectivamente.

La (10), expresa un balance de masa en el que la cantidad de producto que fue procesado por el intermediario y enviado al detallista deberá ser igual a él.

La restricción (11) actúa como límite superior de la cantidad de producto a enviar, asegurando que como máximo enviará cierta cantidad de fruta compuesta por un rendimiento máximo por el número total de hectáreas activadas.

La restricción (12) actúa como límite inferior de la cantidad de producto a enviar, asegurando que como mínimo enviará cierta cantidad de fruta compuesta por un rendimiento mínimo por el número total de hectáreas activadas.

La restricción (13) determina el número de viajes óptimos que puede realizar la variable Z entre el producto agrupado y el intermediario, dado por la cantidad de producto en el flujo 1 y la capacidad del vehículo, se le suma 1 para mejorar el tiempo computacional del trabajo.

La restricción (14) determina el número de viajes óptimos que puede realizar la variable ZZ entre el intermediario y el detallista, dado por la cantidad de producto en el flujo 2 y la capacidad del vehículo, se le suma 1 para mejorar el tiempo computacional del trabajo.

La restricción (15) determina el número de personas necesarias a contratar en el centro de acopio, dado por un rendimiento promedio de capacidad productiva de una persona en un cultivo cítrico y la cantidad de producto enviado desde el nodo i .

La restricción (16) determina el número de personas necesarias a contratar en el intermediario, dado por la cantidad de producto en el flujo 1 y la capacidad de procesamiento de la persona en el intermediario.

La restricción (17) determina el número de personas necesarias a contratar en el detallista, dado por la cantidad de producto en el flujo 2 y la capacidad de procesamiento de la persona en el detallista.

La restricción (18), (19) y (20) representa las definiciones de las variables.

En la restricción (21) se limita el número de kilómetros que puede recorrer el modelo esto se hace mediante la utilización de un número muy grande que representa la suma total de las distancias entre los diferentes eslabones.

ENFOQUE MULTIOBJETIVO:

Para encontrar una solución que optimice de manera integral el componente económico, social y ambiental formulado en una sola función objetivo, se utiliza el método ϵ -constraint planteado en el modelo referente debido a su simplicidad y fácil implementación.

El modelo propuesto busca minimizar los costos representado por α , minimizar el impacto ambiental representado por γ y maximizar el beneficio social representado por β , como se describe a continuación.

$$\text{Min } (\alpha, \gamma) \wedge \text{Max } (\beta) \quad (4)$$

Para dar solución a esto se emplea el método ϵ -constraint descrito en Mavrotas (2009) citado por Mota et al (2015), el cual permite optimizar una de las funciones objetivo utilizando las otras como restricciones y agregando todas las restricciones empleadas en las funciones objetivo (Mota et al 2015), es decir:

$$\text{Min } f_1(x)$$

s.t

$$f_2(x) \geq e_2$$

$$f_3(x) \geq e_3$$

...

$$f_p(x) \geq e_p$$

$$x \in S$$

Según el modelo referente la función objetivo que pasa a ser optimizada es la económica, mientras que las funciones social y ambiental pasan a ser restricciones. Es por esto que la función objetivo del modelo integrado es:

$$\begin{aligned}
\text{Minimizar } & \left(\sum_{i=1}^1 \sum_{j=1}^7 CP \cdot X_{ij} + \sum_{i=1}^1 \sum_{j=1}^7 CI_j \cdot X_{ij} + CMP \cdot S + \sum_{j=1}^7 CMO_j \cdot SS_j \right. \\
& + \sum_{k=1}^4 CD_k \cdot SSS_k + \sum_{i=1}^1 \sum_{j=1}^7 CT \cdot Z_{ij} \cdot DPl_{ij} + \sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^4 CT \cdot ZZ_{jk} \cdot DID_{jk} \\
& \left. + \sum_{i=1}^1 \sum_{j=1}^7 CDA_{ij} \cdot P_{ij} \cdot X_{ij} + \sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^4 CTF_{jk} \cdot PP_{jk} \cdot Y_{jk} \right)
\end{aligned}$$

Sujeto a:

Se retoman las restricciones generales de los modelos matemáticos individuales que se mencionan en la tabla 13 exceptuando las restricciones 15,16 y 17 debido a que en el enfoque multi-objetivo pasan a ser las restricciones 22, 23 y 24 respectivamente. De igual modo se utilizan las restricciones especiales que se mencionan en la tabla 14 y se agregan las restricciones 25 y 26 que corresponden a las funciones objetivo social y ambiental, respectivamente. Ver tabla 15.

Tabla 15: Restricciones enfoque multi-objetivo

ESTRUCTURA DE RESTRICCION MULTIOBJETIVO	FORMULACION MATEMATICA
22. DE PERSONAS EN EL PRODUCTOS AGRUPADO	$\sum_{i=1}^1 \sum_{j=1}^7 \left(\frac{X_{ij}}{CA} \right) \leq S$
23. DE PERSONAS EN EL INTERMEDIARIO	$\sum_{i=1}^1 \left(\frac{X_{ij}}{CB_j} \right) \leq SS_j ; \forall j \in J$
24. DE PERSONAS EN EL DETALLISTA	$\sum_{j=1}^7 \left(\frac{Y_{jk}}{CC_k} \right) \leq SSS_k ; \forall k \in K$
25. FUNCIÓN OBJETIVO SOCIAL	$S + \sum_{j=1}^7 SS_j + \sum_{k=1}^4 SSS_k \geq ES$

ESTRUCTURA DE RESTRICCION MULTIOBJETIVO	FORMULACION MATEMATICA
26. FUNCIÓN OBJETIVO AMBIENTAL	$\sum_{i=1}^1 \sum_{j=1}^7 Z_{ij} \cdot DPI_{ij} \cdot IT_j$ $+ \sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^4 ZZ_{jk} \cdot DID_{jk} \cdot IT_j$ $\leq EA$

Fuente: Autores.

Donde:

- ES: corresponde al épsilon de la función objetivo social.
- EA: representa el valor de épsilon de la función objetivo ambiental.

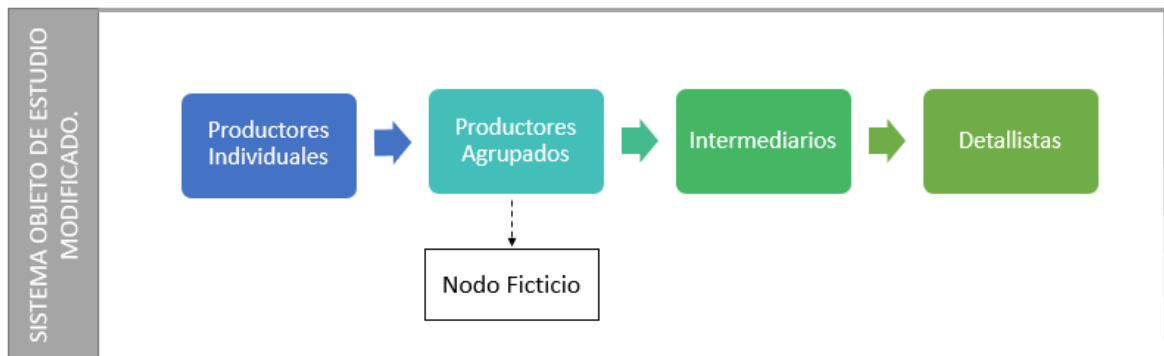
Para aplicar correctamente el método de restricción, se debe tener el rango de cada función objetivo que se usara como restricciones, este rango permitirá determinar los diferentes valores de épsilon que pueden tomar. El enfoque más común es calcular estos rangos a partir de la tabla de pagos (la tabla con los resultados de la optimización individual de las funciones objetivo) Mavrotas (2009).

9. CASO DE ESTUDIO.

Para la aplicación del modelo propuesto se presenta la adaptación a un caso estudio que presenta el diseño de una cadena de abastecimiento de tres eslabones para la distribución de limones en la región central del Valle del Cauca.

El primer eslabón que se contempló está formado por 66 pequeños productores agrícolas, los cuales emplean técnicas de trabajo con bajo nivel tecnológico y muy artesanal. Se encuentran distribuidos geográficamente alrededor de Andalucía – Valle del Cauca, debido a su cercana ubicación se decide desprestigiar las distancias y agruparlos en la consolidación de un nodo ficticio que simulará un centro de acopio para los productores individuales (ver figura 4). Se contemplan actividades de cosecha y recolección, además se tienen en cuenta los rendimientos de producto por hectárea y la cantidad de terrenos utilizados en la actividad productiva.

Figura 4: *Eslabones del sistema objeto de estudio modificado.*



Fuente: Autores.

El segundo eslabón hace referencia a los 7 intermediarios. Los cuales realizan actividades de distribución, clasificación y procesamiento de fruta, además de eso, se consideran como los responsables del transporte y la distribución de producto entre todos los eslabones de la cadena.

El último eslabón que se considera son los detallistas, que están compuestos por 4 entidades que representan a supermercados y centros de abasto, en donde se encargan de actividades relacionadas con la comercialización, es la entidad que tiene relación directa con los consumidores y otros distribuidores minoristas.

El funcionamiento de la cadena comienza en los pequeños productores. La variable binaria que se describe en el modelo propuesto tiene la misión de escoger a aquellos productores considerando tanto sus rendimientos, así como la eficacia productiva del personal en las labores realizadas, y el cumplimiento de demanda de fruta exigida por el intermediario. El intermediario de acuerdo con sus requerimientos toma la decisión de comprar a los agricultores que atienda sus expectativas. Al completar los requerimientos, se realiza el primer transporte en donde se contempla que el producto puede sufrir en cualquier momento un daño que afecte su calidad, durante el recorrido hasta la llegada al centro de distribución. Al ser descargada, la fruta sufre de un proceso de clasificación y separación generando posibles pérdidas al sistema, también se realizan actividades de procesamiento y limpieza que mejoran la presentación de la fruta. Seguidamente, la fruta sale de las instalaciones del intermediario y realiza un segundo transporte en el cual también es posible que se presenten daños durante el trayecto hasta la localización del detallista, quien se encarga de recibir la fruta y devolver aquella que no se encuentre con las condiciones pactadas, aquí también se deben cumplir con los requerimientos de demanda del cliente. Tanto para intermediarios como para detallistas se tienen capacidades de procesamiento de fruta distinta dadas las particularidades de cada entidad y el grado de especialización que puede tener la mano de obra.

Entre las características que presenta la cadena se tiene que:

- No hay procesos estandarizados, lo cual genera una baja calidad en el producto que en este caso es el limón y además de eso, un gran porcentaje de pérdida y desperdicio de fruta;

- También, se evidencia un bajo control en las operaciones debido a la falta de registros y a la manera informal de realizar las actividades.
- Los tres eslabones de la cadena no presentan ninguna integración que les genere beneficios adicionales.
- La cadena se caracteriza por presentar poco trabajo formal y porque las entidades no presenten planes de acción relacionados con la reducción de impactos ambientales generados al medio ambiente.
- Dentro del estudio se consideran las capacidades productivas de la fuerza laboral que integra cada entidad.
- El estudio es realizado para un horizonte de tiempo semanal para las diferentes actividades consideradas.

SUPUESTOS PARA EL CASO DE ESTUDIO

- Los productores son dueños de los terrenos que cultivan.
- Hay una flota para el transporte disponible y es indiferente su utilización para cualquiera de los nodos productor- intermediario o intermediario-detallista y se puede disponer de esta según los requerimientos.
- El transporte del productor no se considera y es despreciable para el estudio.
- Los costos de transporte son asumidos por el intermediario.
- Es un modelo monoprodueto.
- El modelo no tiene definido un horizonte de planeación; más si se tiene definido que corre para un único periodo.
- El cambio climático no afecta el precio de venta ni la producción.
- No se consideran las emisiones producidas por empleo de combustibles fósiles en el cultivo.
- La demanda no varía en el tiempo.
- Las distancias entre el nodo de productores individuales y el centro de acopio son despreciables.

10. DESARROLLO DEL MODELO PROPUESTO.

A continuación se describe el proceso de aplicación del modelo.

PROGRAMACIÓN DEL MODELO MATEMATICO.

Para la programación de los modelos matemáticos se utiliza el lenguaje de programación AMPL, el cual es capaz de expresar en notación algebraica problemas de optimización tales como los problemas de programación lineal.

Este lenguaje está compuesto por:

- Archivo del modelo: integrado por variables, restricciones, y objetivos, expresados con la ayuda de conjuntos y parámetros. Donde se utiliza la siguiente notación:
 - set [nombre del conjunto].
 - param [nombre del parámetro] {a que conjunto pertenece} ≥ 0 .
 - var [nombre de la variable], dependiendo de la naturaleza de la variable se puede poner: {a que conjunto pertenece} ≥ 0 , {a que conjunto pertenece} integer o binary.
 - Maximize o minimize [nombre que de la función objetivo].
 - subject to [nombre de la restricción] {a que conjunto pertenece}.
- Archivo de datos: compuesto por los conjuntos y parámetros declarados en el archivo del modelo, se utiliza la notación de set y param.
- Archivo de comandos: reconoce dos modos, que serían: modo modelo, reconoce las declaraciones del modelo y el modo datos, en el cual sólo se reconocen instrucciones referentes a la introducción de datos.

DATOS UTILIZADOS.

Para la aplicación del caso de estudio se realizó la consolidación de la información obtenida de fuentes directas con la aplicación de encuestas a productores,

intermediarios y detallistas de la cadena, además de complementarla con fuentes indirectas tomada de información disponible en la literatura y reportes de entidades gubernamentales y agremiaciones.

11. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de cada componente y del enfoque multi-objetivo. Por último, se realiza un análisis de los resultados arrojados por los modelos matemáticos.

Los resultados del modelo económico, ambiental y social, son obtenidos mediante el uso de la plataforma Neos Solver for Optimization ®. La solución del modelo se realiza con un horizonte de tiempo de una semana, debido a la característica perecedera del producto.

RESULTADOS DEL COMPONENTE ECONOMICO.

Para dar solución al modelo matemático del componente económico planteado en el capítulo 8, se usó el lenguaje de programación AMPL mediante el solver GUROBI bajo la Plataforma del NEOS. Dando 149 variables de las cuales 66 son binarias, 47 enteras y 36 lineales, con 78 restricciones en total de las cuales 20 son de igualdad y 58 de desigualdad. Supliendo la demanda requerida y cumpliendo con las restricciones establecidas, la función objetivo arroja un valor de \$ 37.865.073,5 pesos colombianos por semana, dando los siguientes resultados:

Tabla 16. Resultados del modelo económico.

CONSOLIDACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL MODELO ECONÓMICO				
Correspondiente al flujo 1: del productor agrupado i y el intermediario j	Cantidad de producto a ser enviada por semana		Número de viajes realizados por semana	
	Xij [Kg/semana]		Zij [Viajes/semana]	
	Variable	Cantidad	Variable	Cantidad
	X11	4818	Z11	3
	X12	4775	Z12	2
	X13	4480	Z13	3
	X14	4508	Z14	2
	X15	3980	Z15	1
	X16	2972	Z16	2
	X17	1863	Z17	1
	TOTAL	27396	TOTAL	14
Correspondiente al flujo 2: realizado en el intermediario j y el detallista k.	Yjk [Kg/semana]		ZZjk [Viajes/semana]	
	Variable	Cantidad	Variable	Cantidad
	Y11	1590,1	ZZ11	1
	Y12	707,6	ZZ12	1
	Y13	1916,4	ZZ13	1
	Y23	4184,5	ZZ23	2
	Y32	2578,2	ZZ32	2
	Y34	1700,1	ZZ34	1
	Y41	1730,9	ZZ41	1
	Y42	1760,3	ZZ42	1
	Y53	3323,1	ZZ53	1
	Y64	2316,5	ZZ64	1
	Y74	1738,4	ZZ74	1
	TOTAL	23546,1	TOTAL	13
Número de hectáreas totales utilizadas				
W [Hectáreas]				
Variable Cantidad				
W1 48				
TOTAL 48				
Número de personas necesarias por entidad				
S, SSj SSSk [MO/semana]				
Variable Cantidad				
S1 120				
SS1 6				
SS2 5				
SS3 7				
SS4 7				
SS5 5				
SS6 4				
SS7 3				
SSS1 3				
SSS2 6				
SSS3 8				
SSS4 5				
TOTAL 179				

Fuente: Autores.

En la tabla 16 se agrupan las variables X_{ij} y Z_{ij} debido a que sus resultados corresponden al flujo 1, de igual modo se agrupan Y_{jk} y ZZ_{jk} ya que se relacionan con el flujo 2 de la cadena. También, los resultados de la cantidad de hectáreas

utilizadas, variable W ; el número de personas a contratar en S , SS_j y SSS_k , es decir, en el centro de acopio, en el intermediario y en el detallista, respectivamente.

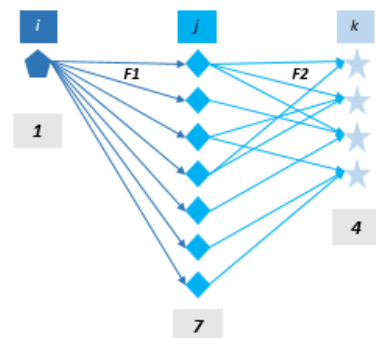
Tabla 17. Resultados de la variable Bu en el modelo económico.

PRODUCTORES INDIVIDUALES ACTIVADOS POR LA VARIABLE Bu																					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1
23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1
45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fuente: Autores.

Al correr el modelo, la variable binaria Bu toma valores de apertura de 63 puntos de origen entre los productores, es decir, que el modelo activa a 63 productores para atender la demanda de los intermediarios. Ver tabla 17.

Gráfica 4. Grafo de resultados del modelo económico.



Fuente: Autores.

La gráfica 4 muestra la decisión de distribución, dado por los resultados arrojados en las variables X_{ij} que es la cantidad de producto a enviar y Z_{ij} que es número de viajes a realizar desde el nodo i hasta el nodo j , flujo 1. De igual modo, muestra el flujo 2 el cual está determinado por las variables Y_{jk} que es la cantidad de producto a enviar y ZZ_{jk} que es número de viajes a realizar desde el nodo j hasta el nodo k .

RESULTADOS DEL COMPONENTE SOCIAL.

Para dar solución al modelo matemático del componente social planteado en el capítulo 8, se usó el lenguaje de programación AMPL mediante el solver GUROBI bajo la Plataforma del NEOS. Dando 66 variables binarias, 47 variables enteras y 36 variables lineales, con 20 restricciones de igualdad y 58 restricciones de desigualdad. Al maximizar el número de empleados a contratar la función objetivo arroja un óptimo de 242 personas por semana, dando los siguientes resultados:

Tabla 18. *Resultados del modelo social.*

CONSOLIDACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL MODELO SOCIAL					
Correspondiente al flujo 1: del productor agrupado i y el intermediario j	Cantidad de producto a ser enviada por semana		Número de viajes realizados por semana		Número de hectáreas totales utilizadas
	Xij [Kg/semana]		Zij [Viajes/semana]		
	Variable	Cantidad	Variable	Cantidad	
	X11	5621	Z11	3	
	X12	2865	Z12	2	
	X13	3840	Z13	2	
	X14	11592	Z14	5	
	X15	3184	Z15	1	
	X16	4458	Z16	2	
	X17	4968	Z17	3	
TOTAL		36528		TOTAL	18
Correspondiente al flujo 2: realizado en el intermediario j y el detallista k.	Yjk [Kg/semana]		ZZjk [Viajes/semana]		Número de personas necesarias por entidad
	Variable	Cantidad	Variable	Cantidad	
	Y11	929,6	ZZ11	1	
	Y13	3838,1	ZZ13	2	
	Y21	26,5	ZZ21	1	
	Y23	2483,4	ZZ23	1	
	Y32	3741,7	ZZ32	2	
	Y41	2364,9	ZZ41	1	
	Y42	2252,4	ZZ42	1	
	Y44	4067,6	ZZ44	2	
	Y53	2658,5	ZZ53	1	
	Y63	2800	ZZ63	1	
	Y64	536,4	ZZ64	1	
	Y72	4938,9	ZZ72	3	
	TOTAL		30638		
S, Ssj SSSk [MO/semana]					
Variable	Cantidad				
S1	160				
SS1	7				
SS2	3				
SS3	6				
SS4	18				
SS5	4				
SS6	6				
SS7	8				
SSS1	3				
SSS2	13				
SSS3	10				
SSS4	4				
TOTAL		242			

Fuente: Autores.

La tabla 18 está dividida en 6 secciones las cuales corresponden a las variables utilizadas en el modelo matemático. Se agrupan las secciones X_{ij} y Z_{ij} debido a que sus resultados corresponden al flujo 1, de igual modo se agrupan Y_{jk} y ZZ_{jk} ya que

van relacionadas con el flujo 2 de la cadena. Además, se presentan los resultados de la cantidad de hectáreas utilizadas, en función de la variable W Por otro lado tenemos los resultados del número de personas a contratar en el centro de acopio, en el intermediario y en el detallista.

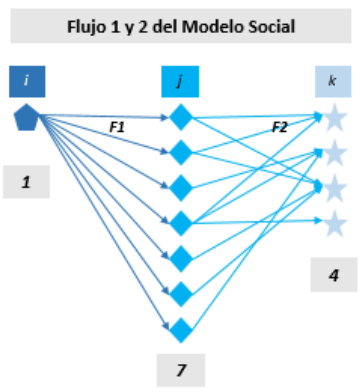
Tabla 19. Resultados de variable Bu en el modelo social.

PRODUCTORES INDIVIDUALES ACTIVADOS POR LA VARIABLE Bu																					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1
45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fuente: Autores.

Para cumplir con la demanda el modelo activa a 64 productores, esto está determinado por los rendimientos y hectáreas asociados a cada productor, ya que, de este modo se determina la cantidad de producto que circula por la cadena, ver tabla 19.

Gráfica 5. Grafo de resultados del modelo social.



Fuente: Autores.

La gráfica 5 ilustra como están conectados los eslabones de la cadena según los resultados obtenidos en las variables X_{ij} , Z_{ij} , y_{jk} y ZZ_{jk} .

RESULTADOS DEL COMPONENTE AMBIENTAL.

Para dar solución al modelo matemático del componente ambiental planteado en el capítulo 8, se usó el lenguaje de programación AMPL mediante el solver GUROBI bajo la Plataforma del NEOS. Dando 66 variables binarias, 47 variables enteras y 36 variables lineales, con 20 restricciones de igualdad y 58 restricciones de desigualdad. La función objetivo arroja un óptimo de 524 kilos de CO₂ emitidos por semana, este resultado cumple con la demanda requerida, dando los siguientes resultados:

Tabla 20. Resultados del modelo ambiental.

CONSOLIDACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL MODELO AMBIENTAL				
Correspondiente al flujo 1: del productor agrupado i y el intermediario j	Cantidad de producto a ser enviada por semana		Número de viajes realizados por semana	
	Xij [Kg/semana]		Zij [Viajes/semana]	
	Variable	Cantidad	Variable	Cantidad
	X11	4818	Z11	3
	X12	5730	Z12	3
	X13	3840	Z13	2
	X14	4508	Z14	2
	X15	6368	Z15	2
	X16	2972	Z16	2
	X17	3726	Z17	2
	TOTAL	31962	TOTAL	16
Correspondiente al flujo 2: realizado en el intermediario j y el detallista k.	Yjk [Kg/semana]		ZZjk [Viajes/semana]	
	Variable	Cantidad	Variable	Cantidad
	Y11	1860,5	ZZ11	1
	Y12	964,1	ZZ12	1
	Y14	1502,2	ZZ14	1
	Y21	159,4	ZZ21	1
	Y23	4856,8	ZZ23	2
	Y32	3741,7	ZZ32	2
	Y41	3515,2	ZZ41	2
	Y53	4567,2	ZZ53	1
	Y54	785,3	ZZ54	1
	Y64	2316,5	ZZ64	1
	Y72	3704,2	ZZ72	2
	TOTAL	27973,1	TOTAL	15
	W [Hectáreas]		S, SSj SSSk [MO/semana]	
	Variable	Cantidad	Variable	Cantidad
	W1	46,7	S1	140
	TOTAL	46,7	SS1	6
			SS2	6
			SS3	6
			SS4	7
			SS5	8
			SS6	4
			SS7	6
			SSS1	5
			SSS2	10
			SSS3	8
			SSS4	4
			TOTAL	210

Fuente: Autores.

La tabla 20 muestra los resultados obtenidos en las variables empleadas en el modelo matemático, como la cantidad de hectáreas utilizadas, relacionado con W ; el número de personas a contratar en S , SS_j y SSS_k , es decir, en el centro de acopio,

en el intermediario y en el detallista, respectivamente. Por otro lado, unas variables se relacionan por el tipo de flujo, es por esto que se agrupan en dos. El primer grupo estaría compuesto por X_{ij} y Z_{ij} debido a que sus resultados corresponden al flujo 1, el segundo grupo sería las variables Y_{jk} y ZZ_{jk} ya que van relacionadas con el flujo 2 de la cadena.

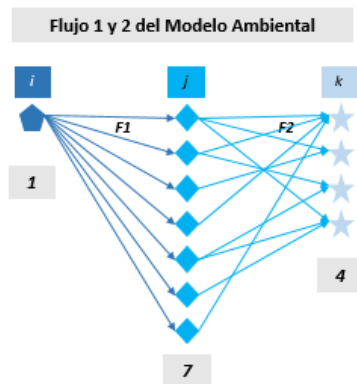
Tabla 21. Resultados de variable Bu en el modelo ambiental.

PRODUCTORES INDIVIDUALES ACTIVADOS POR LA VARIABLE Bu																					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1		1		1	1	1
23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
1		1	1	1	1			1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1
45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fuente: Autores.

El modelo activa a 59 productores para cumplir con los requerimientos de la cadena, Ver tabla 21.

Gráfica 6. Grafo de resultados del modelo ambiental.



Fuente: Autores.

En la gráfica 6 se observa los resultados de cómo se distribuyen los flujos entre cada nodo.

RESULTADOS DEL ENFOQUE MULTI-OBJETIVO.

Al tener los resultados óptimos de cada función objetivo se procede a realizar la matriz de pagos de la tabla 22 para obtener un rango de cada función objetivo, esto se realiza utilizando los resultados obtenidos en la función objetivo económica como datos de entrada para calcular nuevos valores de la función social y ambiental, dando como resultado 179 personas a contratar y 586,78725 Kg CO2 respectivamente. Este mismo procedimiento se realiza con los resultados obtenidos en la función objetivo social y ambiental.

Tabla 22. *Matriz de pagos.*

	F.O Económica	F.O Social	F.O Ambiental
Min F.O Económica	\$ 37.865.073,50	179	586,78725
Max F.O Social	\$ 52.193.214,95	242	908,287688
Min F.O Ambiental	\$ 43.275.077,96	210	524,8
Unidad	\$	Personas	Emisiones

Fuente: Autores.

Con los datos obtenidos en la matriz de pagos se realiza una serie de combinaciones entre cada par de funciones objetivos arrojando en total 9 resultados diferentes, los cuales se muestran en la tabla 23. Esto permite, realizar un análisis de escenarios donde se varían los valores de épsilon de las funciones objetivo social y ambiental para determinar un resultado que optimice de manera integral los tres componentes de la sostenibilidad.

Tabla 23. *Valores de épsilon.*

Escenario	Epsilon1 Social	Epsilon2 Ambiental	Resultado
1	179	586,78725	\$ 32.496.116,50
2	179	908,287688	\$ 32.496.116,50
3	179	524,8	\$ 32.496.116,50
4	242	586,78725	\$ 36.276.116,50
5	242	908,287688	\$ 36.276.116,50
6	242	524,8	\$ 36.276.116,50
7	210	586,78725	\$ 34.356.116,50
8	210	908,287688	\$ 34.356.116,50
9	210	524,8	\$ 34.356.116,50

Fuente: Autores.

Al observar la tabla 23, se evidencia que el número de personas a contratar afecta considerablemente los costos de la cadena, mientras que los diferentes ϵ del componente ambiental no afectan los resultados de la función multi-objetivo. En el análisis de sensibilidad se explica en más detalle este motivo.

Debido a que los costos son el componente de mayor relevancia en la cadena, se toma como criterio inicial para filtrar las opciones que menos se ajusten a los objetivos. Se descartan los escenarios 4, 5 y 6 ya que estos arrojan costos más altos. Así mismo, se descartan las combinaciones 7, 8 y 9 que presentan una diferencia más alta de \$ 1.860.000 en pesos frente a los escenarios 1, 2 y 3. El segundo criterio usado es aquel que genere menos emisiones, de este modo se escoge la combinación 3 por ser el más bajo entre las opciones disponibles. El criterio social no se considera ya que las últimas 3 opciones presentes tienen el mismo valor. De ahí se obtiene que ϵ para la función objetivo social es de 179 personas por semana y el ϵ para la función objetivo ambiental es de 524.8 Kg CO₂ por semana.

Con los valores de ϵ definidos se procede a dar solución al modelo matemático multi-objetivo planteado en el capítulo 8. Se usó el lenguaje de programación AMPL mediante el solver GUROBI bajo la Plataforma del NEOS. Para su solución se obtuvieron 66 variables binarias, 47 variables enteras y 36 variables lineales, con 8 restricciones de igualdad y 72 restricciones de desigualdad. La función objetivo arroja un valor de \$ 32.496.116,5 pesos colombianos por semana, este resultado cumple con la demanda requerida, dando los siguientes resultados:

Tabla 24. Resultados del modelo multi-objetivo.

CONSOLIDACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL MODELO MULTI-OBJETIVO						
Correspondiente al flujo 1: del productor agrupado i y el intermediario j	Cantidad de producto a ser enviada por semana		Número de viajes realizados por semana		Número de hectáreas totales utilizadas	
	Xij [Kg/semana]		Zij [Viajes/semana]		W [Hectáreas]	
	Variable	Cantidad	Variable	Cantidad	Variable	Cantidad
	X11	3649,3	Z11	2	W1	39
	X12	4775	Z12	2	TOTAL	39
	X13	2000	Z13	1		
	X14	4178,2	Z14	2		
	X15	3067	Z15	1		
	X16	2297,8	Z16	1		
	X17	1192,2	Z17	1		
	TOTAL	21159,5	TOTAL	10		
Correspondiente al flujo 2: realizado en el intermediario j y el detallista k.	Yjk [Kg/semana]		ZZjk [Viajes/semana]		S, SSj SSSk [MO/semana]	
	Variable	Cantidad	Variable	Cantidad	Variable	Cantidad
	Y13	2000	ZZ13	1	S1	130
	Y14	1096,6	ZZ14	1	SS1	5
	Y23	4184,5	ZZ23	2	SS2	5
	Y32	1948,8	ZZ32	1	SS3	4
	Y41	3258	ZZ41	2	SS4	7
	Y53	2560,8	ZZ53	1	SS5	4
	Y64	1791	ZZ64	1	SS6	4
	Y74	1112,4	ZZ74	1	SS7	2
					SSS1	3
					SSS2	3
					SSS3	8
				SSS4	4	
	TOTAL	17952,1	TOTAL	10	TOTAL	179

Fuente: Autores.

La tabla 24 integra en 6 secciones los resultados obtenidos en el modelo matemático, donde: se agrupa la sección 1 y 2 dadas por las variables X_{ij} y Z_{ij} ; la

3 y 4 se integran según Y_{jk} y ZZ_{jk} ; la 5 está dada por el número de hectáreas utilizadas y la 6 por las personas necesarias en los tres eslabones de la cadena.

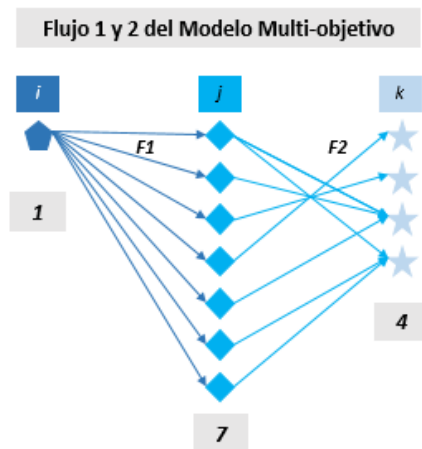
Tabla 25. Resultados de la variable Bu del modelo multi-objetivo.

PRODUCTORES INDIVIDUALES ACTIVADOS POR LA VARIABLE Bu																					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1	1	1
23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
1	1	1	1	1		1		1		1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1		1	1	1	1	1	1

Fuente: Autores.

Para cumplir con las demandas de los intermediarios y de los detallistas el modelo activa a 57 productores, ver tabla 25.

Gráfica 7. Grafo de resultados del modelo multi-objetivo.



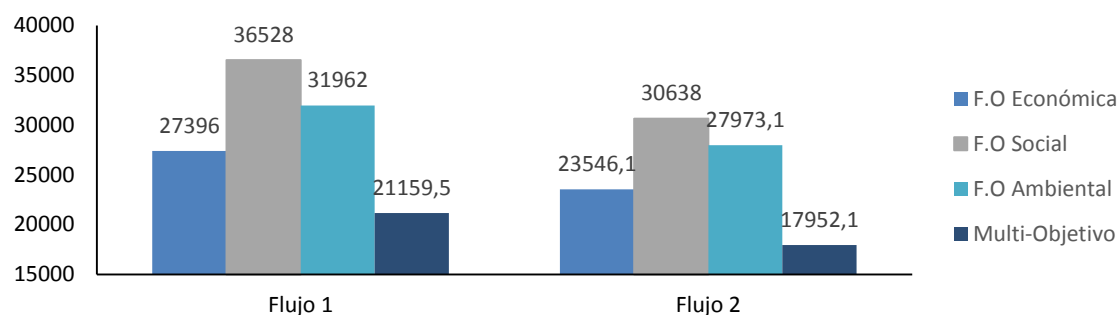
Fuente: Autores.

La gráfica 7 muestra la decisión de distribución entre los eslabones del centro de acopio, los intermediarios y los detallistas, según los resultados obtenidos.

ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Se procede a analizar los resultados obtenidos en el modelo económico, social, ambiental y multi-objetivo, para observar como varían entre ellos.

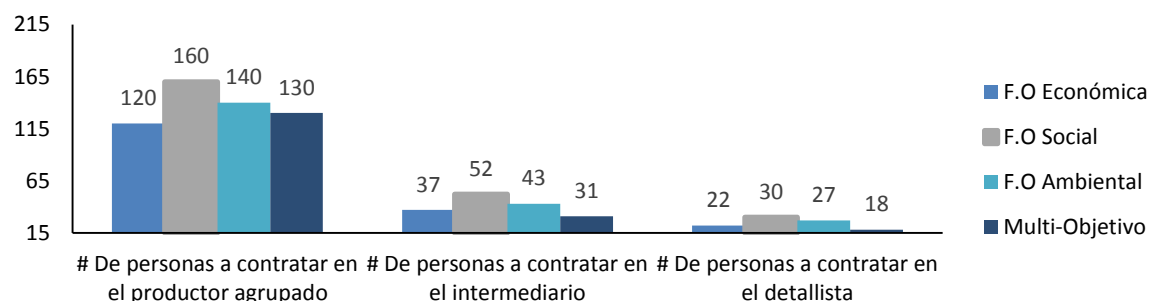
Gráfica 8. *Cantidad de producto a enviar en el flujo 1 y en el flujo 2.*



Fuente: Autores.

En la gráfica 8 se puede apreciar como varia la cantidad de producto a enviar entre los diferentes modelos, presentando un mayor flujo en el modelo social en comparación a los otros. Por otro lado, las cantidades que se distribuyen el modelo multi-objetivo son menores en comparación a los resultados de los componentes individuales, pero aun así se cumple con la demanda requerida en la cadena.

Gráfica 9. *Cantidad de personas a contratar en cada modelo.*

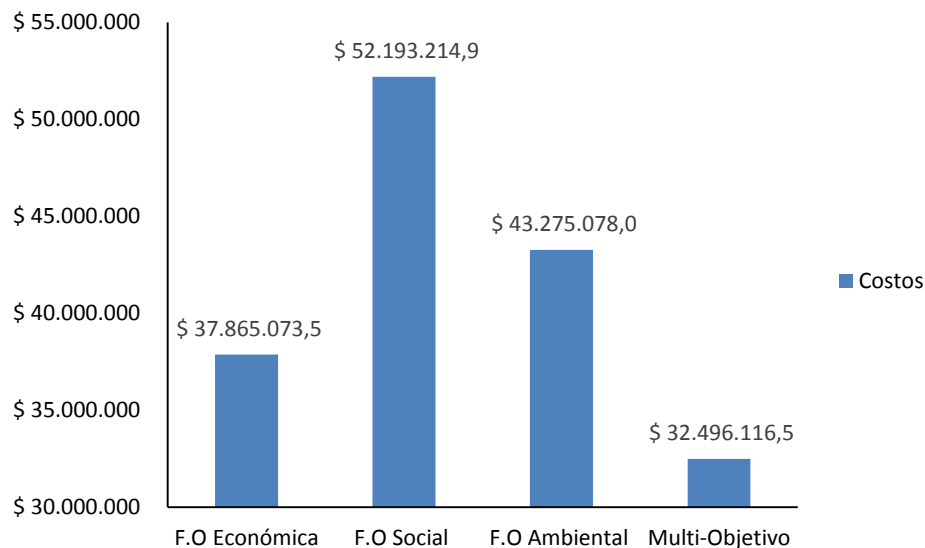


Fuente: Autores.

En la gráfica 9 se muestra la cantidad de personas que contrata cada modelo en función a los eslabones. Se puede observar que el modelo social busca contratar a un mayor número de personas como era de esperarse; seguido por el componente ambiental, esto se debe a la cantidad de producto que circula entre los eslabones.

Para estudiar el comportamiento de los resultados, el modelo multi-objetivo se ajusta a la restricción de contratar 179 personas en total. Se obtiene un aumento de 10 personas en el centro de distribución, una disminución de 6 y 4 personas en el intermediario y detallistas respectivamente, esta comparación se realiza con el componente económico debido a que contratan el mismo número de personas en la cadena.

Gráfica 10. *Costos logísticos arrojados por los modelos matemáticos.*

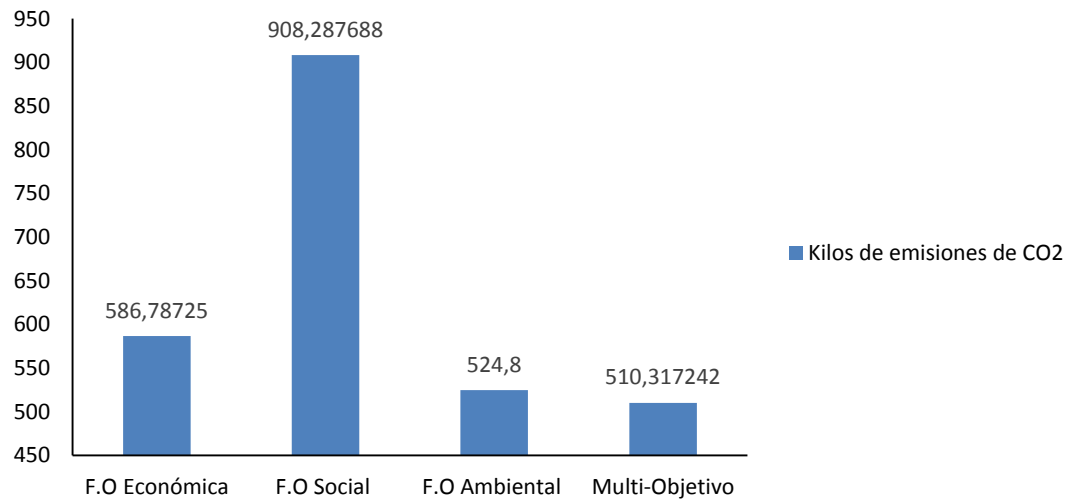


Fuente: Autores.

En la gráfica 10 se observa que los costos logísticos por semana más bajos pertenecen a la función multi-objetivo con \$32.496.116,5 pesos y presentan una diferencia de \$ 5.368.957 pesos colombianos por semana frente al óptimo del componente económico, lo que indica que la integración genera beneficios monetarios a los eslabones de la cadena. Por otro lado, se evidencia que los costos

más elevados los genera la función social, esto sucede porque busca maximizar el número de personas contratadas en los eslabones lo que provoca un mayor flujo de producto, ocasionado un aumento de los costos logísticos.

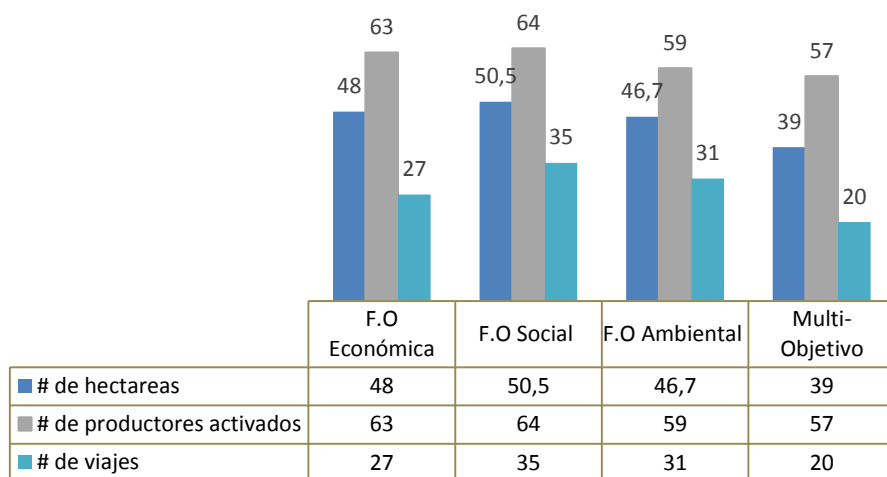
Gráfica 11. *Emisiones generadas por los modelos matemáticos.*



Fuente: Autores.

La gráfica 11 representa la cantidad de emisiones generadas por el transporte durante la realización de los recorridos de distribución del producto. Se evidencia que los kilos de CO2 emitidos entre la función económica y ambiental son próximos entre sí, esto se debe a la relación que presentan en su función objetivo. Por otro lado, se observa que el modelo multi-objetivo presenta un impacto menor que la función ambiental, lo que indica que el resultado arrojado por la integración de los componentes aporta mayores beneficios al entorno en donde interactúa.

Gráfica 12. Cantidad de hectáreas, de productores y número de viajes en los modelos matemáticos.



Fuente: Autores.

En la gráfica 12 se ilustra los resultados de cada función objetivo para la cantidad de hectáreas utilizadas, el número de productores activados, la cantidad total de viajes realizados.

El número de productores abiertos entre el modelo económico y social solo presenta diferencia de una persona, pero debido a la selección que hace de los productores varían en 2,5 las hectáreas. Además, el modelo multi-objetivo presenta los valores más bajo en las tres variables consideradas, esto se debe a que la solución obtenida para los valores de épsilon determinados encontraron una solución con una menor activación de productores, menor cantidad de hectáreas y realizó menos viajes.

En conclusión, el comportamiento de las variables que presentan las soluciones individuales respondan al cumplimiento de cada objetivo por separado y con el manejo de un modelo consolidado se logran que los impactos económicos, sociales y ambientales cumplan con las demandas del mercado y satisfagan los requerimientos de cada uno.

12. ANALISIS DE SENSIBILIDAD.

Los modelos de optimización determinística tienen como característica principal, que los parámetros implícitos en ellos no cambian, estos datos muchas veces están sujetos a perturbaciones externas que pueden afectar la solución óptima, sobre esto, es bien sabido que las soluciones que son altamente sensibles a variaciones de los datos, rara vez son útiles en la práctica. Por esta razón, es necesario derivar condiciones bajo las cuales una solución eficiente es aún eficiente frente a perturbaciones de los parámetros (Le Luc, 2016).

En este capítulo se expone un análisis de sensibilidad del modelo desarrollado. Se analizan los rangos bajos los cuales el valor óptimo de las variables y el valor del lado derecho de las restricciones pueden variar y mantenerse óptima la función objetivo. Se hace uso de funciones especializadas del solver comercial Gurobi, implementado en AMPL a través del servidor Neos Server.

En las tablas 26, 27 y 28 se presentan enumeradas las veinte restricciones del modelo de programación multi-objetivo de acuerdo con el número asociado a cada restricción descrita en el capítulo 8. Obsérvese que el límite mínimo hace referencia a la cota inferior en la cual se puede variar el parámetro, del mismo modo, el límite máximo que se refiere a la cota superior para la variación de las restricciones manteniendo óptima la solución. El valor actual representa la constante del lado derecho de la restricción.

A continuación, se presentan límites arrojados por el análisis de sensibilidad que permiten establecer un rango para el lado derecho de las restricciones donde se establece que tanto se puede cambiar las cantidades sin afectar la solución óptima. Menos infinito e infinito se refiere a un número negativo y positivo muy grande respectivamente, esto quiere decir que estas constantes pueden tomar valores que

decrezcan o crezcan en gran medida, sin que afecte el punto óptimo de la función de triple enfoque.

En los rangos señalados con la letra “N”, se debe a que el solver Gubori no presentó resultados para estas restricciones.

Los valores de los límites que estuvieron cercanos a cero o que arrojaron ese valor, indican que se trata de un parámetro muy sensible y que probablemente al variarlo afecte la función objetivo y cambie la solución óptima, entre ellos se encuentran los siguientes parámetros de acuerdo a su ubicación en el lado derecho de la restricción:

La tabla 26, muestra aquellas restricciones más sensibles.

Tabla 26. *Análisis de sensibilidad parte 1.*

#	RESTRICCIÓN	Subíndice	Valor Actual	Límite Mínimo	Límite Máximo
1	Restricción de rendimientos		25850,2	0	0
3	Capacidad productiva en cultivo		36960,3	0	0
13	Número de viajes realizados en el flujo 1, del productor i hasta el intermediario j.	1	1	0,2	Infinito
		2	1	0,1	Infinito
		3	1	N	Infinito
		4	1	0,3	Infinito
		5	1	0,4	Infinito
		6	1	0,2	Infinito
		7	1	0,4	Infinito
14	Número de viajes realizados en el flujo 2, del intermediario j hasta el detallista k.	1	1	0,5	Infinito
		2	1	0,3	Infinito
		3	1	0	Infinito
		4	1	0,7	Infinito
		5	1	0,5	Infinito
		6	1	0,4	Infinito
		7	1	0,4	Infinito
22	Cant. de personas en el productor.		0	-37,3	Infinito
23	Cantidad de personas empleadas en el productor.	1	0	-0,5	Infinito
		2	0	-0,1	0,2
		3	0	-0,9	Infinito
		4	0	-0,5	Infinito
		5	0	-0,1	Infinito
		6	0	-0,9	Infinito
		7	0	-0,1	Infinito
24	Cantidad de personas empleadas en el detallista	1	0	-0,1	Infinito
		2	0	-0,7	Infinito
		3	0	-0,6	Infinito
		4	0	-0,5	Infinito

Fuente: Adaptado de Neos Solver Optimization ®.

- En la restricción (1), $\sum_{u=1}^{66} RA_u \cdot B_u \leq RB_u$ se encontró que es sensible a alteraciones y ésta representa la sumatoria de los rendimientos individuales de cada productor.

- De la misma manera la restricción (3), $RC \cdot W \leq CN$ es la relación entre la producción máxima esperada con la capacidad total máxima que tiene el centro de acopio.
- Las restricciones (13) y (14) expresadas como $\sum_{i=1}^1 Z_{ij} \leq \sum_{i=1}^1 \left(\frac{X_{ij}}{CV_j} \right) + 1 ; \forall j \in J$ y $\sum_{k=1}^4 Z_{jk} \leq \sum_{k=1}^4 \left(\frac{Y_{jk}}{CV_j} \right) + 1 ; \forall j \in J$ respectivamente, son sensibles a medida que el lado derecho se aproxime al límite inferior equivalente a la capacidad de los vehículos en el flujo 1 de los productores a los intermediarios y del flujo 2 de los intermediarios a los detallistas. Para entender mejor el resultado se puede observar que los límites inferiores del lado derecho pueden tomar valores como por ejemplo 0,3 lo que indica que la diferencia entre el número de viajes y la relación entre las cantidad enviadas y la capacidad de los vehículos, puede tomar ese mínimo valor.
- Para las limitaciones de las capacidades productivas del personal en cada uno de los tres eslabones representan las restricciones (22), (23) y (24), definidas como $\sum_{i=1}^1 \sum_{j=1}^7 \left(\frac{X_{ij}}{CA} \right) \leq S$, $\sum_{i=1}^1 \left(\frac{X_{ij}}{CB_j} \right) \leq SS_j ; \forall j \in J$ y $\sum_{j=1}^7 \left(\frac{Y_{jk}}{CC_k} \right) \leq SSS_k ; \forall k \in K$ medidos en (Kg/Persona) durante una semana, fueron identificadas como altamente sensibles antes de realizar este análisis, ya que durante la etapa de desarrollo de los modelos provocaron inestabilidad en las soluciones individuales y de múltiples objetivos, lo que confirma la evidente excitabilidad ante cambios mínimos. En la tabla también se muestran valores negativos lo que significa que el lado derecho puede llegar a tomar ese tipo de valores, sin afectar el óptimo.

En la tabla 27, Se agrupan aquellas restricciones menos sensibles ante cambios.

Tabla 27. *Análisis de sensibilidad parte 2.*

#	RESTRICCIÓN	Subíndice	Valor Actual	Límite Mínimo	Límite Máximo
2	Balance de número de Hectáreas		0	-11,7	10
5	Capacidad de recepción en el detallista	1	52102	5197,2	Infinito
		2	11917,5	1948,8	Infinito
		3	19989	8745,3	Infinito
		4	12400	4000	Infinito
6	Capacidad del vehículo de intermediario j para el flujo 1	1	0	-350,7	Infinito
		2	0	-225	Infinito
		3	0	N	Infinito
		4	0	-821,8	Infinito
		5	0	-1933	Infinito
		6	0	-502,2	Infinito
		7	0	-807,8	Infinito
7	Capacidad del vehículo de intermediario j para el flujo 2	11	0	-10,2	44,4
		12	0	-903,4	Infinito
		23	0	-815,5	Infinito
		32	0	-51,2	Infinito
		41	0	-1742	Infinito
		53	0	-2439,2	Infinito
		64	0	1009	Infinito
		72	0	-887,6	Infinito
9	Demanda del detallista k	1	3258	3197,2	3321
		2	1835,6	-Infinito	1948
		3	8745,3	8559,5	8843
		4	4000	3989,4	4046
10	Restricción del balance de masa para las cantidades de fruta	1	0	-49,3	11,3
		2	0	-99,3	189,2
		3	0	-113,2	51,2
		4	0	-257,2	60,8
		5	0	-108,4	206,2
		6	0	-47,2	10,8
		7	0	-49,7	11,4
11	Límite máximo de cantidades		0	-7300,1	Infinito
25	Restricción del objetivo social		179	-Infinito	179
26	Restricción del objetivo Ambiental		524,8	510,3	Infinito

Fuente: Autores

Estas restricciones muestran rangos extensos donde el lado derecho de la ecuación puede ser modificado sin afectar los valores de la solución.

Finalmente, se observa la tabla 28 en la cual se exponen cuatro restricciones que no presentaron resultados al realizar el análisis de sensibilidad, por lo tanto, no es posible conocer los rangos de variación para estas limitaciones.

Tabla 28. Análisis de sensibilidad parte 3.

#	RESTRICCIÓN	
4	Cap. de recepción en intermed.	Estas restricciones no presentaron resultados en el análisis realizado.
8	Demanda del intermediario	
12	Limite minimo de cantidades	
21	Máximo Kilometros recorridos	

Fuente: Autores

Después de realizar el análisis de sensibilidad se pueden entender los resultados similares arrojados en la tabla 23 donde se encuentran los valores finales de las funciones objetivo con la combinación de los valores de épsilon hallados en la matriz de pagos (tabla 22).

Como se puede ver en la tabla 23, los 9 escenarios muestran un valor de épsilon ambiental mayor a su cota inferior de 510,3 Kg de dióxido de carbono en la (tabla 27), y no a afecta la solución óptima. Sin embargo, en el valor de épsilon en la función social se puede evidenciar que siempre que este parámetro tome valores mayores a 179 personas (tabla 27) provocará una variación en los resultados de la función multi-objetivo.

CONCLUSIONES.

La información recolectada en la caracterización permitió conocer las falencias y las oportunidades dentro de los sistemas productivos frutícolas a nivel global y nacional. Se identificó para la perspectiva económica el uso intensivo de los recursos, altos costos de producción, carencia de tecnología apropiada y manejo deficiente de la poscosecha. Así mismo, en lo referente a lo social se evidenció la alta implementación de mano de obra, el bajo nivel de escolaridad y empleo formal. Para el componente ambiental se encontraron algunos aspectos como los impactos generados durante las actividades agrícolas por insumos, mal manejo de agua, contaminación por agroquímicos y por la utilización de combustibles fósiles.

Las consideraciones para la modelación matemática de una cadena frutícola suponen un desafío por la cantidad de variables exógenas y endógenas que afecta la toma de decisiones tales como el clima, la calidad del terreno, los daños y pérdidas del producto durante su vida útil, entre otros. Para este problema se consideraron algunas de ellas de acuerdo al potencial acceso de la información, por fuentes directas y secundarias.

Las soluciones de cada función objetivo fueron proporcionales a su intensidad con la inhibición o relajamiento en distintos escenarios, los cuales han sido comparados de acuerdo a los resultados obtenidos. De igual manera, la integración de los tres objetivos de desarrollo sostenible, se puede definir como eficiente ya que se logra el equilibrio de los enfoques en conflicto, arrojando una solución que se adecúa a las necesidades definidas en la cadena.

Al abordar individualmente cada pilar de la sostenibilidad se encontró que el valor óptimo para la función objetivo del pilar económico fue de \$ 37.865.073,5 pesos colombianos por semana, para la función objetivo social fue de 242 personas por semana, para la función objetivo ambiental fue de 524,8 Kg CO₂ por semana. Al

integrar las tres funciones objetivo empleando el método de restricciones, se realizó un análisis de escenarios para determinar el valor de ϵ social y ϵ ambiental, dando 179 personas por semana y 524,8 Kg CO₂ por semana respectivamente. Al utilizar el solver GUROBI bajo la Plataforma del NEOS, la función multi-objetivo arrojó el menor costo logístico con un resultado de \$ 32.496.116,50 pesos cumpliendo con las demandas requeridas y los valores para cumplir con el componente social y ambiental, lo que indica que la integración genera beneficios monetarios a los eslabones de la cadena.

En el análisis de sensibilidad, se revisaron los límites de variación para las restricciones, de modo que no se afectara el óptimo obtenido de la función objetivo, con este se logró identificar aquellas limitaciones más sensibles y que no admiten cambios en sus valores, entre ellas están: los rendimientos del cultivo, la capacidad productiva del cultivo, los números de viajes realizados en ambos flujos y las capacidad productivas de las personas de cada eslabón.

RECOMENDACIONES.

Para futuras investigaciones se recomienda utilizar el método lexicográfico para determinar los rangos de variación de ϵ , debido a que este garantiza que los valores que se toman son Pareto eficiente, de este modo se evitara que se tome puntos dominados.

Se recomienda utilizar el análisis del ciclo de vida para determinar los impactos que genera el producto en la cadena de abastecimiento.

Se recomienda ampliar el alcance del modelo en el componente social debido a que este es un enfoque poco abordado por la complejidad que presenta, por eso se podría considerar incluir el número de personas que se contratan en cada productor individual.

Se propone incluir diferentes tipos de fruta, o distintas calidades que pueden presentar los productos perecederos, debido a que, en un escenario real estás son las condiciones o situaciones que se pueden tener.

Es necesario crear conciencia entre todas las partes interesadas y en particular en los agricultores respecto a la producción responsable.

BIBLIOGRAFÍA.

- Ahi, P. & Searcy, C. (2013). "A comparative literature analysis of definitions for green and sustainable supply chain management". ELSEVIER. Journal of Cleaner Production. Vol 52, pp. 329–341.
- Ahi, P. & Searc, C. (2015). "Assessing sustainability in the supply chain: A triple bottom line approach". ELSEVIER. Applied Mathematical Modelling 39. Pp. 2882-2896.
- Ahi, P., Jaber, M. & Searcy, C. (2016). "A comprehensive multidimensional framework for assessing the performance of sustainable supply chains". Applied Mathematical Modelling, Vol 40, pp. 10153-10166.
- Ahumada, O., Villalobos, J. & Mason, A. (2012). "Tactical planning of the production and distribution of fresh agricultural products under uncertainty". ELSEVIER. Agricultural Systems, Vol 112, pp-17-26.
- Ahumada, O. & Villalobos, J. (2009). "Application of planning models in the agri-food supply chain: A review". ELSEVIER. European Journal of Operational Research, Vol 196, pp. 1-20.
- Álvarez, C., Hernández, C., Piedrahita, S., & Acevedo, J. (2007). "Gestión y certificación agroambiental: camino a la sustentabilidad de la floricultura". Línea de investigación: Gestión ambiental. Semillero SIGMA y Grupo de Investigación GAMA.
- Asocítricos. (2002). Acuerdo de competitividad cadena citrícola del tolima. Recuperado de: <https://sioc.minagricultura.gov.co/Citricos/Documentos/004%20%20Documentos%20Competitividad%20Cadena/004%20%20D.C.%20%20Acuerdo%20Competitividad%20%20Cadena%20Citricola%20Tolima.pdf>.
- Aranda, J. A. & Orjuela, J. A. (2015). "Optimización multiobjetivo en la gestión de cadenas de suministro de biocombustibles. Una revisión de la literatura". En: Ingeniería, Vol. 20, pp. 37–63.

- Arrellano Nancy. (2014). "Un enfoque biobjetivo al problema del reparador". Maestría thesis. Universidad Autónoma de Nuevo León. San Nicolás de los Garza.
- Ballou, Ronald H. (2004). "Logística. Administración de la cadena de suministro". Quinta edición. Pearson Educación, México
- Bortolini, M., Faccio, M., Ferrari, E., Gamberi, M., & Pilati, F. (2016). "Fresh food sustainable distribution: cost, delivery time and carbon footprint three-objective optimization". ELSEVIER. Journal of Food Engineering. Vol 174. Pp 56-67.
- BPA: Buenas practicas Agrícolas. (2012). "Manual de Buenas Prácticas Agrícolas para el Productor Hortofrutícola". 2° Edición. Santiago de Chile.
- Brandenburg, M. & Rebs, T. (2015). "Sustainable supply chain management: a modeling perspective". Annals of Operations Research, Vol 229, pp. 213-252.
- Carter, C.R. & Rogers, D.S. (2008). "A framework of sustainable supply chain management: moving toward new theory". International journal of physical distribution & logistics management. Vol. 38 N° 5, pp. 360-387.
- Cámara de Comercio de Bogotá. (2016). "Participación de los canales en la comercialización de alimentos en Colombia". Recuperado de: <https://www.ccb.org.co/Sala-de-prensa/Noticias-sector-Agricola-y-Agroindustrial/Noticias-2016/Participacion-de-los-canales-en-la-comercializacion-de-alimentos-en-Colombia>
- Chaabane, A., Ramudhin, A. & Paquet, M. (2012). "Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme". International Journal of Production Economics, Vol 135, pp. 37-49.
- Chopra, S. & Meindl, P. (2008). "Administración de la cadena de suministro. Estrategia, planeación y operación". Tercera edición. Pearson Educación, México.

- Comisión europea. (2012). “comunicación de la comisión al parlamento europeo, al consejo, al comité económico y social europeo y al comité de las regiones”. Recuperado de: <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2012/ES/1-2012-784-ES-F1-1.Pdf>.
- Corporación Universitaria Lasallista. (2012). “Cítricos: cultivo, poscosecha e industrialización”. Caldas: Serie Lasallista Investigación y Ciencia.
- DANE. (2016). “El cultivo de la naranja Valencia (*Citrus sinensis* [L.] Osbeck) y su producción como respuesta a la aplicación de correctivos y fertilizantes y al efecto de la polinización dirigida con abeja *Apis mellifera*”. Recuperado de: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/Bol_Ins_umos_oct_2016.pdf
- Elkington John. (2010). “¿Qué es sostenibilidad?”. Revista Semana, Especial empresas sostenibles 2010. (pp. 6-7).
- El país. (2016). “La agricultura, problema y solución”. Recuperado de: https://elpais.com/elpais/2016/11/16/planeta_futuro/1479328266_041681.html.
- El país. (2017). “Valle del Cauca, la segunda región donde más se produce fruta en Colombia”. Recuperado de: <http://www.elpais.com.co/economia/valle-del-cauca-la-segunda-region-donde-mas-se-produce-fruta-en-colombia.html>.
- Esfahbodi, A., Zhang, Y., Watson, G. (2016). “Sustainable supply chain management in emerging economies: Trade-offs between environmental and cost performance”. ELSEVIER. International Journal of Production Economics, Vol 181, Part B. pp 350–366.
- FAO. (2012). “Pérdidas y Desperdicio de alimentos en el mundo”. Roma. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/a-i2697s.pdf>.
- FAO. (2015). “Objetivos de Desarrollo Sostenible”. Recuperado de: <http://www.fao.org/sustainable-development-goals/overview/fao-and-post-2015/sustainable-agriculture/es/>.

- FAO. (2016). "Pérdidas y Desperdicios de Alimentos en América Latina y el Caribe". Recuperado de: <http://www.fao.org/contact-us/en/>.
- Feitó, M., Crespón, R., & Rubio, M. (2016). "Modelos de optimización para el diseño sostenible de cadenas de suministros de reciclaje de múltiples productos". *Ingeniare, Revista chilena de ingeniería*, vol. 24 N° 1. pp. 135-148.
- Fletes, H. B. (2000). "Coordinación territorial en las cadenas de producción de la agroindustria de mango en dos regiones de Colima: 1990-1999". El Colegio de la Frontera Norte, Tijuana.
- García, J., González, A. T., Prado, J. C., & Mejías, A. (2011). "Sostenibilidad y mejora logística. Un caso práctico". In V international conference on industrial engineering and industrial management. XV Congreso de Ingeniería de Organización. pp. 712-721.
- Giovindan, K., Jafarian, A., & Khodaverdi, R. (2013). "A fuzzy multi criteria approach for measuring sustainability performance of a supplier based on triple bottom line approach". *ELSEVIER. Journal of Cleaner Production*, Vol 47, pp. 345-354.
- Giovindan, K., Jafarian, A., Khodaverdi, R., & Devika, K. (2014). "Two-echelon multiple-vehicle location-routing problem with time windows for optimization of sustainable supply chain network of perishable food". *Journal ELSEVIER, Int. J. Production Economics* 152 pp. 9-28.
- González, A., & Rojas, L. (2011). "Diseño preliminar de una cadena de aprovisionamiento y exportación de frutas tropicales desde la región del Valle del Cauca en el marco de los TLC con Canadá y la Unión Europea". Universidad Icesi. Facultad de ingeniería, departamento de Ingeniería Industrial. Cali.
- Gopalakrishnan, K., Yusuf, Y., Musa, A., Abubakar, T., Ambursa, H. (2012). "Sustainable supply chain management: a case study of British Aerospace (BAe)". *Systems.Int.J.Prod.Econ* 140(1), 193–203.

- Graham, B. (2012). "Profile of the Small-Scale Farming in the Caribbean". Initiative Hunger-Free Latin America and the Caribbean. FAO.
- Hakanson, B. (2003). "Manejo de la cadena de abastecimiento: donde compiten los negocios hoy". Administración de la cadena de suministros "Supply Chain", pp. 4-5.
- Hart, S. (1997). "Beyond greening: strategies for a sustainable world". Harvard Business Review, pp 66- 76.
- Hernández, R. (2009). "Importancia socioeconómica del sector frutícola en Colombia". universidad de la Salle, Bogotá.
- Hu J., Zhang X., Moga L. & Neculita M. (2013). "Modeling and implementation of the vegetable supply chain traceability system". Food Control, vol. 30, pp. 341-353.
- Hutchins, M. & Sutherland, J. (2008). "An exploration of measures of social sustainability and their application to supply chain decisions". ELSEVIER. Journal of Cleaner Production. Vol 16. Pp 1688-1698.
- Karaan, M., Ham, C., Akinnifesi, F., Moombe, K., Jordaan, D., Franzel, S. & Aithal, A. (2005). "Baseline marketing surveys and supply chain studies for indigenous fruit markets in Tanzania, Zimbabwe and Zambia". World Agroforestry Centre and CPWild Research Alliance.
- Lambert, D. (2008). "Supply chain management: processes, partnerships, performance". Third edition. Supply Chain Management Institute, Florida.
- Le Luc, Dinh. (2016). "Multiobjective linear programming: an introduction". Springer International Publishing
- Lee, J., Gereffi, G. J. Beauvai, J. (2012). "Global value chains and agrifood standards: challenges and possibilities for smallholders in developing countries". Proceedings of the National Academy of Sciences of the United, vol. 109, pp. 12326-12331.

- Lopera, M., Hornez, J. & Ordóñez, M. (2009). "Guía ambiental hortifrutícola de Colombia". Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Asociación Hortifrutícola de Colombia–Asohfrucol.
- Martínez, H., Espinal, C. & Peña, Y. (2005). "la cadena de cítricos en Colombia una mirada global de su estructura y dinámica 1991-2005". Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural Observatorio Agrocadenas Colombia.
- Mavrotas, G. (2009). "Effective implementation of the ϵ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems". Applied mathematics and computation, Vol 213, pp. 455-465.
- Meek, E. & Aldana, H. (2000). "Acuerdo De Competitividad De La Cadena Productiva De Los Cítricos". Colección Documentos IICA Serie Competitividad No.19.
- Mejías, A., Garacía, J., Prado, J., Fernández, A., & Comesaña, J. (2011). "Modelo para la aplicación de la Responsabilidad Social Corporativa en la Gestión de la Cadena de Suministro". Dirección y Organización, Vol 45, 20-31.
- Mendoza, A., Fontalvo, T. & Visbal, D. (2014). "optimización multiobjetivo en una cadena de suministro". Revista Ciencias Estratégicas. Vol. 22 - No. 32 (Julio - diciembre 2014)
- Ministerio de agricultura y desarrollo rural. (2017). "Plan de acción". Bogotá.
- Ministerio de agricultura. (2016). "Cadena de cítricos, indicadores e instrumentos". Recuperado de:
<https://sioc.minagricultura.gov.co/Citricos/Documentos/002%20-%20Cifras%20Sectoriales/002%20-%20Cifras%20Sectoriales%20-%202016%20Octubre%20Citricos.ppt>
- Morales, S. S. (2014). "Programación Multiobjetivo: Caso práctico aplicado a una compañía aérea". Universidad de Murcia Facultad de Economía y Empresa Romero.

- Moreno, E. (2017). "Metodología de investigación, pautas para hacer Tesis". Recuperado de: <http://tesis-investigacion-cientifica.blogspot.com.co/>.
- Mota, B., Gomes, M., Carvalho, A. & Barbosa, A. (2015). "Towards supply chain sustainability: economic, environmental and social design and planning". ELSEVIER. Journal of Cleaner Production, Vol 105, pp. 14-27.
- Muñoz, A. (2016). "productividad vs erosión. una alternativa sostenible". Facultad de turismo y finanzas. Trabajo Fin de Grado.
- Nevado, D., López, V., & Alfaro, J (2013). "Modelo de presentación de información sobre gestión de la cadena de suministro en las memorias de sostenibilidad". Recherches en Sciences de Gestion. Vol 5, 45-60.
- ONU. (2017). Hambre y seguridad alimentaria - Desarrollo Sostenible. . Recuperado de: <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/hunger/>.
- Osorio, A., Brailsford, S. & Smith, H. (2014). "Un modelo de optimización bi-objetivo para la selección de tecnología y asignación de donantes en la cadena de suministro de sangre". Revista S&T, Vol 12, pp. 9-24
- Pareto, Wilfredo. (1938). "Manual of Political Economy". Translation of French edition from 1927.
- Peña, D. L., Rivera, L., Molina, D. A., Lopez, J. T., Pantoja, M. B., Franco, G. A., Viedman, S. A., Puertas, A. F., Falla, Y. T., Cifuentes, M. A., Victoria, V. H., Gomez, A. M., Benitez, I. D., Pena, V. L., Acosta, C. G., Villafañe C., Alvarez, J. L., Agudelo A., Palomino S., Cano A. F., Ospina Y. A., Rengifo A. L., Arenas, M. A. y Salazar, L. T. (2017). "microcaracterización de la cadena de abastecimiento recopilación teórica y macrocaracterización de la cadena de abastecimiento recopilación teórica". Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia.
- Porter, M.E. & Linde, C.V.D. (1995). "Green and competitive: ending the stalemate". Harvard Business Review, Vol 73, pp 120-135.
- Pradenas, L. & Matamala, E. (2012). "Una formulación matemática y de solución para programar cirugías con restricciones de recursos humanos en

el hospital público Ingeniare”. Ingeniare, Revista Chilena de Ingeniería, vol. 20, pp. 230-241.

- Procolombia. (2013). “El mundo interviene en Colombia, inversión en el sector hortofrutícola”. Recuperado de: Procolombia.com.
- Quesada, V. & Vergara, J. (2006). “Análisis cuantitativo con WINQSB”. Edición electrónica. Recuperado de: www.eumed.net/libros/2006c/216/
- Rajkumar, P. (2010). “Food mileage: an indicator of evolution of agricultural outsourcing”. Journal of Technology Management & Innovation, vol. 5, pp. 37-46.
- Rajeev, A., Pati, R., Padhi, S. & Govindan, K. (2017). “Evolution of sustainability in supply chain management: A literature review”. ELSEVIER. Journal of Cleaner Production, Vol 161, pp. 299-314
- Reyes, O. & Franklin, O. (2014). “Teoría del bienestar y el óptimo de Pareto como problemas microeconómicos”. Revista Electrónica de Investigación en Ciencias Económicas, Abriendo Camino al Conocimiento, Vol 2, pp. 217-234.
- Schöggl, J., Fritz, M., & Baumgartner, R. (2016). “Toward supply chain-wide sustainability assessment: A conceptual framework and an aggregation method to assess supply chain performance”. Journal of Cleaner Production, Vol 131, pp. 822-835.
- Salcedo, S. & Guzman, L. (2014). “Agricultura Familiar En América Latina Y El Caribe: Recomendaciones de Política”. Publicado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura Santiago, Chile.
- Salin, V. (1998). “Information technology in agri-food supply chains”. ELSEVIER. International Food and Agribusiness Management Review, vol. 1, pp. 329-334.
- Secretaría de agricultura y desarrollo rural de Antioquia. (2012). “Diagnóstico inicial de la cadena de cítricos en el Departamento de Antioquia”. Medellín.

- Seuring, S., (2013). "A review of modeling approaches for sustainable supply chain management". ELSEVIER. *Decision Support Systems*, Vol 54, pp. 1513–1520.
- Seuring, S. & Müller, M. (2008). "From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management", *Journal of Cleaner Production*, Vol 16, pp 1699-1710.
- Shukla, M., & Jharkharia, S. (2013). "Agri-fresh produce supply chain management: a state-of-the-art literature review". *International Journal of Operations & Production Management*, Vol 33, pp. 114-158.
- Soto W., Nadal S., González M., Pla L. (2016). "Operational research models applied to the fresh fruit supply chain". ELSEVIER. *European Journal of Operational Research*, Vol 251, pp 345-355.
- Tafur, R., Toro, J., Perfetti, J., Ruiz, D., & Morales, J. (2006). "Plan frutícola nacional (PFN)". Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Fondo Nacional de Fomento Hortofrutícola, Asohofrucol, SAG, 43.
- Toulmin, C. & Guéye, B. (2003). "Transformations in West African agriculture and the role of family farms". International institute for environment and development. Issue paper no. 123.
- Tovar, Édmer. (2013). "Lo que tiene en jaque al agro colombiano". Recuperado de: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-13052762>
- Wolfert, J., Verdouw, C. N., Verloop, C. M., & Beulens, A. J. M. (2010). "Organizing information integration in agri-food a method based on a service-oriented architecture and living lab approach". *Computers and electronics in agriculture*, Vol 70, pp. 389-405.
- Validi, S., Bhattacharya, A., & Byrne, P. (2014). "A case analysis of a sustainable food supply chain distribution systema multi-objective approach". *International Journal of Production Economics*, Vol 152, pp. 71-87.

- Vallejo, C. (2007). "Hortalizas en Colombia. Palmira (V)". Revista Horticultura Brasileira, Vol. 25, No. 1. Recuperado de: www.abhorticultura.com.br
- Vargas, O. (2014). "Gestión de compras eficientes y sostenibles: modelo para la gestión de la cadena de suministro y para romper paradigmas". Punto de Vista, Vol 5.
- Verdouw, C., Beulens, A., Trienekens, J. & Wolfert, J., (2010). "Process modelling in demand-driven supply chains: A reference model for the fruit industry". Computers and Electronics in Agriculture, vol. 73, pp. 174-187.
- Vianchá, Zulma. (2014). "Modelos y configuraciones de cadenas de suministro en productos perecederos". Revista Científica Ingeniería y Desarrollo, vol 32.
- Viceministro de ambiente. (2009). Guía ambiental hortofrutícola de Colombia. Asohofrucol.
- Yu, M. & Nagurney, A. (2013). "Competitive food supply chain networks with application to fresh produce". ELSEVIER. European Journal of Operational Research, vol. 224, pp. 273-282.